

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THEOMA MURIEL SANCHES OTOBO

SINMCEL - NOVA METODOLOGIA DE VISUALIZAÇÃO GRÁFICA APLICADA A
UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO MULTIPONTO

CURITIBA

2020

THEOMA MURIEL SANCHES OTOBO

SINMCEL - NOVA METODOLOGIA DE VISUALIZAÇÃO GRÁFICA APLICADA A
UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO MULTIPONTO

Tese aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Telecomunicações, Departamento de Engenharia Elétrica, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ph.D. Horácio Tertuliano dos Santos Filho.

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

O88s

Otobo, Theoma Muriel Sanches

SINMCEL - nova metodologia de visualização gráfica aplicada a um sistema de transmissão multiponto [recurso eletrônico] Theoma Muriel Sanches Otobo. – Curitiba, 2020.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

Orientador: Horácio Tertuliano dos Santos Filho.

1. Sistemas de transmissão de dados. 2. Telecomunicações. 3. Confiabilidade (Engenharia). I. Universidade Federal do Paraná. II. Santos Filho, Horácio Tertuliano dos. III. Título.

CDD: 621.3191

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **THEOMA MURIEL SANCHES OTOBO** intitulada: **SINMCEL - NOVA METODOLOGIA DE VISUALIZAÇÃO GRÁFICA APLICADA A UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO MULTIPONTO**, sob orientação do Prof. Dr. HORACIO TERTULIANO DOS SANTOS FILHO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 18 de Junho de 2020.

Assinatura Eletrônica
19/06/2020 18:37:36.0
HORACIO TERTULIANO DOS SANTOS FILHO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
19/06/2020 14:48:38.0
JOSE RICARDO DESCARDECI
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE TOCANTINS)

Assinatura Eletrônica
19/06/2020 08:55:31.0
ALEXANDRE RASI AOKI
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
18/06/2020 20:28:33.0
PAULO HENRIQUE PORTELA DE CARVALHO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu orientador Doutor Horácio Tertuliano dos Santos Filho, pelo apoio contínuo ao meu doutorado. Ele não apenas me conduziu desde o primeiro contato da pesquisa até finalização desta tese, mas também fortemente contribuiu para o meu desenvolvimento como profissional. Além do meu orientador, gostaria de agradecer também a banca da minha qualificação de tese, pelos seus comentários, discussões e contribuições importantes.

Gostaria de agradecer a todos os meus queridos ex-colegas do laboratório PK10 em especial a Ellen Nogueira, Márcio Marques, Renan Portelinha, Jefferson Matias e Ana Torres pela convivência, que ajudou no meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Um agradecimento especial também ao Engenheiro Claudio Bastos, que foi um parceiro de estudos nesta longa jornada, de quem ouvi ideias e ponderadas contribuições para esta pesquisa.

Eu também gostaria de agradecer a Capes pelo apoio financeiro durante todo o período de doutorado.

Por último, mas não menos importante, gostaria de fazer um agradecimento em especial ao meu pai Doutor Alex Otobo, minha mãe Scheherazade Otobo, ao meu irmão Chidi Otobo, ao meu companheiro de vida João Kuanzambi e a todos amigos que me deram força e apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa. Essa vitória também é de vocês, o meu muito Obrigada.

“Aprendi que coragem não é a ausência de medo, mas o triunfo sobre ele. O homem corajoso não é aquele que não sente medo, mas o que conquista esse medo”.

Nelson Mandela

RESUMO

Atualmente, os interesses em telecomunicações estão voltados para uma discussão global sobre temas como redes 5G, diferentes tipos de modulação, altas taxas de transferência de dados e, também, sobre a possibilidade de serviços focados principalmente em oferecer qualidade e segurança para o usuário. Em contrapartida, um problema que se observa acerca da área de rádio propagação diz respeito à falta de bibliografias recentes que descrevam, de forma completa e clara, a operacionalização detalhada do processo de concepção do Sistema de Transmissão, principalmente, sob o ponto de vista de atualizações de ferramentas de predição *open source*. Torna-se, portanto, importante rever e otimizar essa infraestrutura já implantada e seu *modus operandi*, com a finalidade de oferecer um aprimoramento em relação aos softwares de análise utilizados. A principal contribuição deste trabalho é o de oferecer uma metodologia aprimorada de análise, aplicada a Sistemas de Transmissão do tipo ponto-multiponto, capaz de realizar simulações simultâneas entre diferentes modelos de propagação. E para isso, foi desenvolvido neste estudo o *software* SINMCEL que faz uso de uma técnica inovadora titulada de Diagrama de Nivelamento. A base de dados desses diagramas, são fundamentadas nos modelos empíricos de propagação em consonância com os elementos relevantes do sistema. As formulações matemáticas, foram implementadas na linguagem PHP e *JavaScript*. Para fins de validação, o cenário da aplicação foi criado para a Cidade de Curitiba, onde toda uma análise técnica foi realizada mantendo como foco os aspectos relacionados aos modelos de propagação e aos parâmetros de referência do sistema: normas e recomendações técnicas, geometria, frequência, perdas, potências, ruído e a confiabilidade de cada *link*. A combinação deste método gráfico com análises simultâneas para diferentes modelos de propagação resultou em uma nova alternativa de interface de análise que permite a visualização fim a fim de todos os parâmetros que estruturam um sistema. Foram realizadas comparações entre os resultados obtidos pela ferramenta SINMCEL e pelos *softwares open source* *Radio Mobile* e *LinkCalc* onde foi possível observar que todos os *links* analisados pela ferramenta SINMCEL, apresentaram em sua grande parte um bom desempenho assim como uma confiabilidade acima de 97%.

Palavras-Chave: Sistema de Transmissão. Diagrama de Nivelamento. Modelos de Propagação. Legislação. Desempenho e Confiabilidade.

ABSTRACT

Currently, interests in telecommunications are focused on a global discussion on topics such as 5G networks, different types of modulation, high data transfer rates and, also, on the possibility of services focused mainly on offering quality and security to the user. On the other hand, a problem that is observed in the area of radio propagation concerns the lack of recent bibliographies that describe, in a complete and clear way, the detailed operationalization of the transmission system design process, mainly from the point of view of updates to open source prediction tools. It is, therefore, important to review and optimize this already implemented infrastructure and its modus operandi, in order to offer an improvement in relation to the analysis software used. The main contribution of this work is to offer an improved analysis methodology, applied to Point-Multipoint Transmission Systems, capable of performing simultaneous simulations between different propagation models. And for this, the SINMCEL software was developed in this study, which uses an innovative technique called the Leveling Diagram. The database of these diagrams are based on empirical models of propagation in consonance with the relevant elements of the system. The mathematical formulations were implemented in PHP and JavaScript. For validation purposes, the application scenario was created for the City of Curitiba, where a whole technical analysis was carried out keeping the aspects related to the propagation models and the system reference parameters as focus: technical standards and recommendations, geometry, frequency, losses, power, noise and the reliability of each link. The combination of this graphic method with simultaneous analyzes for different propagation models resulted in a new alternative analysis interface that allows the end to end visualization of all the parameters that structure a system. Comparisons were made between the results obtained by the SINMCEL tool and by the open source software Radio Mobile and LinkCalc where it was possible to observe that all the links analyzed by the SINMCEL tool, presented in a large part a good performance as well as a reliability above 97%.

Keywords: Transmission System. Leveling Diagram. Prediction Models. Legislation. Performance and Reliability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - SISTEMA DE TRANSMISSÃO PONTO – MULTIPONTO DE ESTAÇÕES FIXAS.....	22
FIGURA 2 - RÁDIO ENLACE SOB LINHA DE VISADA SOFRENDO REFLEXÕES NO SINAL.....	26
FIGURA 3 - FENÔMENOS FÍSICOS COMUNS AO MEIO DE PROPAGAÇÃO.	26
FIGURA 4 - FORMULÁRIOS EXIGIDOS PELA ANATEL.....	27
FIGURA 5 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.	30
FIGURA 6 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.	30
FIGURA 7 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz.	31
FIGURA 8 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 11 GHz.	31
FIGURA 9 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 18 GHz.	31
FIGURA 10 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 23 GHz.	32
FIGURA 11- PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS AS FREQUENCIAS DE 2,4 GHz.....	32
FIGURA 12 - MODELO DO ESPAÇO LIVRE SOB LINHA DE VISADA DIRETA.....	45
FIGURA 13 - TELA DOS RESULTADOS DO RADIO MOBILE COM A DEMOSTRAÇÃO DE ANÁLISE DA FERRAMENTA.....	52
FIGURA 14 - TELA DOS RESULTADOS OBTIDOS PELA FERRAMENTA <i>LINKCALC</i>	53
FIGURA 15 -FLUXOGRAMA QUE REPRESENTA A PRIMEIRA FASE DO SISTEMA.	71
FIGURA 16 -RECURSOS UTILIZADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA SINMCEL.....	74
FIGURA 17 - SÍNTESE DAS FUNÇÕES IMPLEMENTADAS NA LINGUAGEM EM PHP	75
FIGURA 18 -A <i>LANDING PAGE</i> DO SOFTWARE.	76

FIGURA 19 -LAYOUT DA FERRAMENTA EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS INICIAIS DA ENTRADA.	76
FIGURA 20 -LAYOUT DA FERRAMENTA EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE ENTRADA RELACIONADOS A FREQUÊNCIA.....	77
FIGURA 21 -EXEMPLO DE TRANSIÇÃO DINÂMICA QUANDO O USUÁRIO ESQUECE DE PREENCHER UMA DAS ENTRADAS OBRIGATÓRIAS.	78
FIGURA 22 -IMPLEMENTAÇÃO DA API DA GOOGLE NA FERRAMENTA SINMCEL PARA DETERMINAR A LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE UM <i>LINK</i>	79
FIGURA 23 -IMPLEMENTAÇÃO DA FERRAMENTA PDKIT PARA GERAR RELATÓRIO EM PDF.....	79
FIGURA 24 -ESTRUTURA DO DIAGRAMA DE NIVELAMENTO NO FORMATO DE BARRAS DINÂMICAS.....	80
FIGURA 25 -ESTRUTURA DO DIAGRAMA DE NIVELAMENTO NO FORMATO DE LINHAS E SETAS	81
FIGURA 26 -LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES UTILIZANDO A FERRAMENTA <i>GOOGLE MAPS</i>	86
FIGURA 27 -PARAMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DO <i>LINK</i> (UT_CP)	86
FIGURA 28 -DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE PERDAS E DE POTÊNCIA DO <i>LINK</i> (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.	88
FIGURA 29 -DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE RUÍDO DO <i>LINK</i> (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.	92
FIGURA 30 -DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE DO <i>LINK</i> (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.....	96
FIGURA 31 -PARAMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DO <i>LINK</i> (UT_CP) CONSIDERANDO O DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO.....	100
FIGURA 32 -DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO PARA O <i>LINK</i> (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz.....	101

FIGURA 33 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.	106
FIGURA 34 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz.	107
FIGURA 35 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.	108
FIGURA 36 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz.	109
FIGURA 37 -PARAMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DO <i>LINK</i> (UT_SA).	111
FIGURA 38 -DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE PERDAS E DE POTÊNCIA DO <i>LINK</i> (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz.	112
FIGURA 39 -DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE RUÍDO DO <i>LINK</i> (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz.	115
FIGURA 40 -DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE DO <i>LINK</i> (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz.....	118
FIGURA 41 -PARAMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DO <i>LINK</i> (UT_SA) CONSIDERANDO O DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO.....	120
FIGURA 42 -DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO PARA O <i>LINK</i> (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.....	121
FIGURA 43 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz.	126
FIGURA 44 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.	127
FIGURA 45 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz	128
FIGURA 46 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.	129
FIGURA 47 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 18 GHz.....	131

FIGURA 48 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz.....	132
FIGURA 49 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 18 GHz.....	132
FIGURA 50 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O <i>LINK</i> (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz.....	133
FIGURA 51 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O <i>LINK</i> (CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 23 GHz.	135
FIGURA 52 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O <i>LINK</i> (CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.	135
FIGURA 53 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O <i>LINK</i> (CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 23 GHz.	136
FIGURA 54 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O <i>LINK</i> (CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.....	137
FIGURA 55 -RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DO RESULTADOS DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA DO <i>LINK</i> (CP_P).....	138
FIGURA 56 -GRÁFICO COMPARATIVO DO RESULTADOS DA POTÊNCIA RECEBIDA.....	139

LISTA DE TABELA

TABELA 1 - PRINCIPAIS NORMATIZAÇÕES APLICADAS A PROJETOS DE RADIO ENLACE.....	29
TABELA 2 - MÉTRICAS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO	36
TABELA 3 - MÉTRICAS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO – RESULTADOS DA FASE 1.....	36
TABELA 4 - MÉTRICAS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO – RESULTADOS DA FASE 2.....	36
TABELA 5 - MÉTRICAS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO – RESULTADOS DA FASE 3.....	37
TABELA 6 - REGIÕES DE ATENUAÇÃO DO MODELO <i>LONGLEY - RICE</i>	46
TABELA 7 - VALORES ESTIMADOS PARA IRREGULARIDADE DO TERRENO ...	48
TABELA 8 - REFRATIVIDADE DA SUPERFÍCIE	49
TABELA 9 - VARIÁVEIS REFERENTES AOS TIPOS DE TERRENOS	50
TABELA 10 -VALORES PADRÃO DE ACORDO COM O CENÁRIO DE ESTUDO ...	51
TABELA 11- ANTENAS UTILIZADAS NAS FREQUÊNCIA DE 2,4 GHz, 3,5 GHz E 5 GHz.	57
TABELA 12 -ANTENAS UTILIZADAS NAS FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz, 8,5 GHz E 11 GHz.	58
TABELA 13 -ANTENAS UTILIZADAS NAS FREQUÊNCIA DE 18 GHz E 23 GHz. ...	59
TABELA 14 -CARACTERÍSTICAS DOS CABOS.	60
TABELA 15 -TIPOS DE CONECTORES.	61
TABELA 16 -RELAÇÃO ENTRE A FATOR DE RUÍDO E A TEMPERATURA	65
TABELA 17- DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA	72
TABELA 18 -RESULTADOS REFERENTES A GEOMETRIA DOS SITES.	85
TABELA 19 -IDENTIFICAÇÃO DOS COMPONENTES QUE ESTRUTURAM O DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO.....	99
TABELA 20 -COMPARAÇÃO ENTRE OS <i>SOFTWARES</i>	110
TABELA 21 -COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NO <i>LINK (UT_P)</i>	130
TABELA 22 -COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NO <i>LINK (CP_SA)</i>	134
TABELA 23 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NO <i>LINK (CP_SA)</i>	138

LISTA DE SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional das Telecomunicações
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
PHP	<i>Hypertext Preprocessor</i>
MD	Margem de Desvanecimento
E.I.R.P	Potência Isotrópica Efetivamente Irradiada
MDI	Margem de Desvanecimento por Interferência
AAS	Área de Assinatura
MDF	Margem de desvanecimento Dispersivo
RIPP	Ruído Interferente devido a Polarização Paralela
RIPC	Ruído Interferente devido a Polarização Cruzada
PIDNS	Probabilidade de Inoperância devido ao Desvanecimento não Seletivo
PIDS	Probabilidade de Inoperância em razão do Desvanecimento Seletivo
PITMA	Probabilidade do Período de Inoperância Total em Minutos por Ano
PTO	Porcentagem de Tempo de Operação
Conf	Confiabilidade Final do Sistema
RSR	Relação Sinal Ruído
RT100%	Ruído total para 100% do Tempo
RT80%	Ruído Total para 80% do Tempo
RT50%	Ruído Total para 50% do Tempo
BER	Bit Error Rate
<i>Link</i>	Enlace
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
SHF	<i>Super high frequency</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
SUI	Modelo <i>Stanford University Interim</i>

LISTA DE SIMBOLOS

Δ	Distância Ortodrômica dado em graus
A_c	Perda no Cabo
A_e	Perda no espaço Livre
L_0	Perda por Transmissão
A_{ab}	Perda por Absorção de Gases
P_t	Potência Transmitida
P_r	Potência Recebida
FR	Figura de Ruído
VS	Valor de Sistema
LB	Largura de Banda
λ	Comprimento de Onda
K	Inoperância do Sistema
EL	Modelo do Espaço Livre
RC	Modelo do Longley Rice
SU	Modelo SUI
ERI	Modelo Ericsson
UT	Site que representa a Universidade Tecnológica Federal do Paraná
CP	Site que representa o Centro Politécnico
SA	Site que representa o Setor das Agrárias
P	Site que representa a Universidade Positivo
RE	Ruído de eco

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	19
1.2 JUSTIFICATIVA	20
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	21
1.3.1 Objetivo Geral	21
1.3.2 Objetivos Específicos	21
1.4 METODOLOGIA	22
1.5 CONTRIBUIÇÕES DA TESE	23
1.6 ESTRUTURA DA TESE	24
CAPÍTULO 2 CARACTERÍSTICAS DE UM CANAL DE PROPAGAÇÃO E A LEGISLAÇÃO VIGENTE PERTINENTE AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO	25
2.1 CARACTERÍSTICAS DE UM CANAL DE PROPAGAÇÃO	25
2.2 PARÂMETROS QUE ENGLOBAM UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO	27
2.3 APLICAÇÃO DA ENGENHARIA	32
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	33
CAPÍTULO 3 ESTADO DA ARTE	35
3.1 MÉTODO DE COLETA DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO	35
3.2 ANTERIORIDADE - REVISÃO DA LITERATURA	37
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	39
CAPÍTULO 4 MODELOS DE PROPAGAÇÃO	41
4.1 MODELOS DE PROPAGAÇÃO	41
4.1.1 Tipos de Ambientes	43
4.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO UTILIZADOS	44
4.2.1 Modelo do Espaço Livre	44
4.2.2 Modelo Longley Rice	46
4.2.3 Modelo Sui	49
4.2.4 Modelo Ericsson 9999	50
4.3 SOFTWARES DE PREDIÇÃO TRADICIONAIS	51
4.3.1 Software <i>Radio Mobile</i>	51
4.3.2 Software <i>LinkCalc</i>	52
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	53
CAPÍTULO 5 PARÂMETROS DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO	54

5.1	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO	54
5.2	PARÂMETROS DE GEOMETRIA	54
5.3	PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA E PROPAGAÇÃO	56
5.4	PARÂMETROS DE POTÊNCIA	63
5.5	PARÂMETROS DE RUÍDO	64
5.6	PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE	68
5.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	70
	CAPÍTULO 6 MATERIAIS E MÉTODOS	71
6.1	SISTEMA DE TRANSMISSÃO (PARTE 1)	71
6.2	METODOLOGIA DETALHADA	73
6.2.1	Materiais e Métodos Utilizados	74
6.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	82
	CAPÍTULO 7 SIMULAÇÕES E RESULTADOS	84
7.1	SISTEMA DE TRANSMISSÃO – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA (PARTE 2)	84
7.1.2	Especificações das Características Desejadas	84
7.2	RESULTADOS REFERENTES A GEOMETRIA	85
7.2.1	Análise Gráfica	85
7.3	RESULTADOS E ANÁLISES ATRAVÉS DOS DIAGRAMAS DE NIVELAMENTO PARA O <i>LINK</i> (UT_CP)	86
7.3.1	Análise através do Diagrama de Nivelamento Estático (para o <i>link</i> UT_CP) ..	98
7.3.2	Análise Comparativa dos Resultados do <i>Link</i> (UT_CP) em relação a outros <i>Softwares</i>	105
7.4	RESULTADOS E ANÁLISES ATRAVÉS DOS DIAGRAMAS DE NIVELAMENTO PARA O <i>LINK</i> (UT_SA)	111
7.4.1	Análise através do Diagrama de Nivelamento Estático (para o <i>link</i> UT_SA) ..	119
7.4.2	Análise Comparativa dos Resultados do <i>Link</i> (UT_SA) em relação a outros <i>Softwares</i>	125
7.5	RESULTADOS E ANÁLISES PARA O <i>LINK</i> (UT_P)	129
7.5.1	Análise Comparativa dos Resultados do <i>Link</i> (UT_P) em relação a outros <i>Softwares</i>	131
7.6	RESULTADOS E ANÁLISES PARA O <i>LINK</i> (CP_SA)	134
7.6.1	Análise Comparativa dos Resultados do <i>Link</i> (CP_SA) em relação a outros <i>Softwares</i>	135

7.7	RESULTADOS E ANÁLISES PARA O <i>LINK</i> (CP_C).....	137
7.7.1	Análise Comparativa dos Resultados do Link (CP_P) em relação a outros Softwares	138
7.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	139
	CAPÍTULO 8 CONCLUSÃO E PROPOSTAS FUTURAS	141
8.1	CONCLUSÃO.....	141
8.2	CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	142
8.3	TRABALHOS FUTUROS	143
8.4	PUBLICAÇÕES.....	144
	REFERÊNCIAS.....	145
	APÊNDICE 1- PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS REFERENTES A SIMULAÇÃO DO LINK (UT_P)	150
	APÊNDICE 2- PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS REFERENTES A SIMULAÇÃO DO LINK (CP_SA).....	156
	APÊNDICE 3- PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS REFERENTES A SIMULAÇÃO DO LINK (CP_P)	161
	ANEXO 1- RESULTADOS REFERENTES A SIMULAÇÃO DO <i>LINK</i> (UT_CP) GERADOS PELAS FERRAMENTAS <i>RADIO MOBILE</i> E <i>LINKCALC</i>.....	162

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo mostra como esta tese encontra-se estruturada e também apresenta em linhas gerais a pesquisa desenvolvida. Tópicos relacionados a contextualização do trabalho, justificativa, objetivos, metodologia, contribuições e a definição dos assuntos que serão abordados nos demais capítulos, serão mostrados aqui.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

O Setor de Telecomunicações busca fazer com que, cada vez mais, o processo de comunicação ocorra de forma rápida, segura e disponível a qualquer tempo e em qualquer lugar. Fica claro que à medida que novas tecnologias surgem e com elas mais facilidades e novas aplicações, alteram-se ou modificam-se as necessidades e o comportamento dos usuários, por consequência, aumentam os esforços de engenharia e investimentos nesta área. Portanto, os sistemas de telecomunicações experimentam ao longo dos anos contínuas evoluções, baseadas em estudos relacionados entre outros, à propagação de ondas eletromagnéticas bem como novas técnicas de avaliação do QoS (*Quality of Service*) de um sistema.

Isto posto, daquilo que concerne à área de radiopropagação, o estudo desta pesquisa procurou focar na discussão dos aspectos que influenciam diretamente um Sistema de Transmissão: o seu desempenho e a sua confiabilidade. O desempenho é caracterizado como sendo uma combinação de vários fatores que diversificam, desde a ocupação espectral, normas técnicas e resoluções legais, estrutura física, modelos de propagação, níveis de potência e níveis de ruído enquanto que a eficiência espectral, em linhas gerais, indica como a banda utilizada na transmissão está sendo usada, ou seja, quanto mais eficiente for o uso da banda, maior será o volume de informações transmitidas. Neste trabalho, a eficiência espectral foi expressa pela associação da escolha da frequência de operação em relação a legislação vigente que a regulariza.

Com relação aos modelos de propagação, pode-se dizer que são usualmente utilizados em diferentes cenários que atendem características específicas, com a finalidade de satisfazer os requisitos e a complexidade das aplicações, através do

modelamento dos efeitos de propagação do canal, (ROCHE, 2012 apud KITAO, 2015).

Por outro lado, os níveis de potência descrevem a influência que os elementos constituintes do ambiente de propagação exercem sobre o sinal transmitido até seu destino final; assim como os níveis de ruído descrevem qualquer sinal indesejável que interfira no processo de transmissão do sistema. E, por fim, a confiabilidade se traduz como sendo a habilidade do sistema de executar suas funções, dentro de limites permitidos por normas técnicas. Para assegurar um desempenho satisfatório do sistema não é prudente dissociar nenhum desses pontos pelo fato de que a simples ideia de concepção de um Sistema de Transmissão passa pela compreensão desses fatores conjuntamente interligados.

Do exposto, o principal objetivo desse trabalho é o de oferecer uma nova ferramenta gráfica de visualização para a análise operacional de um Sistema de Transmissão ponto multiponto.

1.2 JUSTIFICATIVA

A justificativa de desenvolver esta pesquisa originou-se primeiramente na investigação sobre o funcionamento dos *softwares* de predição (quer sejam eles livres ou não) comumente utilizados na área. A partir daí, notou-se que a maioria deles traduzem seus resultados de simulações de forma embutida, normalmente por meio de tabelas, planilhas, curvas estatísticas ou comparativas. Apesar dessas formas de apresentação de resultados atingirem êxito e serem frequentemente utilizadas na maioria dos trabalhos da área, percebeu-se uma carência na compreensão sobre o detalhamento dos parâmetros que atuam diretamente sobre estes resultados, os quais são gerados pela ferramenta de predição, mas que não estão visíveis ao usuário. Além desse ponto, outro aspecto importante também observado nessas ferramentas de predição tradicional, é o fato de que cada simulação realizada por elas considera apenas um modelo de propagação por análise, ou seja, não existe ainda um *software* de predição que seja capaz de gerar e comparar de forma simultânea dois ou mais modelos de propagação.

Portanto, entende-se que a partir dos fatos aqui enumerados, nasceu a ideia de desenvolver esta pesquisa com o objetivo de trazer, para a área de rádio

propagação, uma contribuição original na forma de uma interface visual que analisa e detalha os principais parâmetros que constituem o ambiente de propagação e estruturam um Sistema de Transmissão.

No que tange as premissas iniciais de desenvolvimento desse estudo, foi realizada uma pesquisa sobre artigos que poderiam trazer contribuições bibliográficas no processo de desenvolvimento do tema. Esses trabalhos serão discutidos no Capítulo III.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método interativo computacional de análise de predição de um sistema, que seja capaz de simular simultaneamente modelos de propagação, explorando também os parâmetros pertinentes a um Sistema de Transmissão.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Sintetizar a ideia de funcionamento da metodologia através de um fluxograma;
- Elaborar uma base de dados – Implementação em PHP (Hypertext Preprocessor) fundamentada na formulação matemática dos modelos de propagação e nos parâmetros relativos ao sistema: recomendações e normas técnicas, geometria, frequências, perdas, potência, ruído e confiabilidade;
- Implementar normas técnicas e legais no PHP – definição de canalização e limites atribuídos a cada frequência de operação que será estudada neste trabalho;
- Construir o *Software na* página Web – com o objetivo de gerar os gráficos interativos intitulados de Diagrama de Nivelamento;
- Desenvolver a técnica de Diagramas de Nivelamento Dinâmico e Estático – com a finalidade de gerar simulações simultâneas entre modelos de propagação. Esses Diagramas devem ser desenvolvidos por meio da linguagem de programação PHP e *JavaScript*;
- Realizar análises comparativas dos resultados – para validar o processo metodológico que será utilizado neste trabalho (utilizando o *software MATLAB®*);

- Criar relatórios em PDF na forma individual ou coletiva (até 8 *links*) – com o intuito de verificar o desempenho de cada enlace que estrutura o Sistema de Transmissão como um todo;

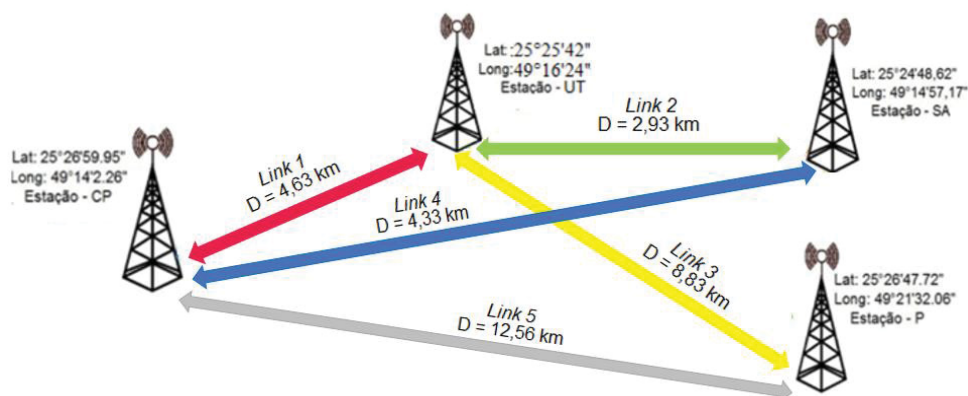
1.4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho fez uso das linguagens de programação em PHP (uma linguagem interpretada livre) e JAVASCRIPT (linguagem de programação interpretada estruturada), simulações nos *softwares Radio Mobile* (ferramenta computacional de predição *open source*) e *LinkCalc* (ferramenta computacional de predição fornecida pela empresa *LigoWave* na versão *open source*) e também simulações na ferramenta *MatLab* (MATrix LABoratory - que realiza cálculos numéricos). Por se tratar de uma pesquisa de caráter exploratório de um estudo de caso, a base teórica utilizada foi fundamentada em literatura específica da área.

O estudo de caso proposto é a simulação de um cenário de geração de um sinal em frequências distintas, tendo por premissa a utilização da banda superior do espectro na faixa de micro-ondas (UHF - *Ultra High Frequency*), e de ondas centimétricas (SHF - *Super High Frequency*). Também foi levado em consideração, para a escolha das frequências, fatores relacionados a demanda de serviço, quantidade de usuários por canal e a possibilidade técnica de se utilizar sistemas do tipo ponto - multiponto dentro dessa faixa.

Do exposto a FIGURA 1, ilustra o Sistema de Transmissão que será estudado neste trabalho:

FIGURA 1 – SISTEMA DE TRANSMISSÃO PONTO – MULTIPONTO DE ESTAÇÕES FIXAS.



FONTE: A autora (2018).

O cenário mostrado na FIGURA 1, representa o estudo de caso que será analisado e simulado ao longo dessa pesquisa. A metodologia é baseada na análise de um sistema ponto – multiponto, que cobre cinco *links* com distâncias que variam de 2 km a 13 km, cobrindo tanto a região urbana densa quanto a região urbana da cidade de Curitiba. Visando à obtenção de dados que descrevem as características mais relevantes desse Sistema, foram selecionadas frequências licenciadas que operam na faixa de 3,5 GHz, atualmente ainda na fase de padronização no Brasil, e também de 5 GHz, 8,5 GHz, 11 GHz, 18 GHz e 23 GHz e nas frequências não licenciadas operando nas faixas de 2,4 GHz e 5,8 GHz.

A partir desse contexto, são construídos os diagramas de nivelamento de sinal que serão utilizados para análise de cada *link* em operação. Os Diagramas de Nivelamento serão visualizados de duas formas: a primeira consistirá em uma estrutura composta de barras distribuídas em blocos, que se movimentam e realizam comparações de modo visual, entre os resultados obtidos dos cenários de simulação, enquanto a segunda forma baseia-se em uma estrutura fixa de linhas e setas contínuas, nos sentidos verticais e horizontais.

A base de dados desses diagramas são fundamentadas nos modelos empíricos e teórico de propagação em consonância com os elementos relevantes que constituem o ambiente. As formulações matemáticas, decorrentes do desenvolvimento, são implementadas na linguagem PHP e *JavaScript*.

1.5 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A principal contribuição desse trabalho será a apresentação de uma metodologia original, tendo como foco fundamental oferecer uma ferramenta visual interativa, para a análise dos resultados de um Sistema de Transmissão. A metodologia adotada foi fundamentada no desenvolvimento de uma ferramenta intitulada de “*Software* Inteligente de Nivelamento que Mapeia e Controla Dados entre *Links* – SINMCEL”, o qual utiliza a técnica denominada de Diagrama de Nivelamento, com a finalidade de comparar os resultados obtidos no processo de concepção, por meio de análises simultâneas entre os modelos de propagação.

A vantagem dessa metodologia reside no fato de ser uma interface intuitiva, em que se torna possível explorar, de forma visual, os parâmetros do sistema com

mais transparência, bem como fazer alterações e correções com maior facilidade e agilidade, diferentemente da forma como atualmente é feito, quando se utiliza análise gráfica tradicional, como por exemplo: *softwares* como *LinkCalc* e *Radio Mobile* (ferramentas *open source*).

Portanto, utilizando essa técnica pode-se obter informações mais detalhadas e pontuais sobre as características operacionais, em relação aos parâmetros desejados na transmissão/recepção entre os *links*.

1.6 ESTRUTURA DA TESE

Em conformidade com as normas e com a estrutura de um documento científico, os demais capítulos desta tese estão organizados em oito capítulos.

Capítulo 2: Este capítulo apresenta resumidamente uma fundamentação teórica que será utilizada nesta pesquisa, além de um breve histórico sobre a evolução dos sistemas de rádio, mostrando sucintamente a descrição sobre os elementos que incorporam a sua arquitetura básica. Também, neste capítulo, são descritas as principais características de um canal de propagação, as limitações em relação as frequências de operação, dando ênfase as principais normatizações vigentes que as regulamentam.

Capítulo 3: Apresenta o estado da arte através de um método científico que foi utilizado para a escolha dos artigos relacionados ao tema desta pesquisa.

Capítulo 4: Apresenta-se os principais tipos de modelos de propagação de RF presentes na literatura científica e que serão utilizados neste estudo.

Capítulo 5: De modo sumarizado, são discutidos os principais elementos que formam o ambiente de um Sistema de Transmissão.

Capítulo 6: Neste capítulo, detalha-se o processo metodológico usado para o desenvolvimento do *software* SINMCEL bem como dos Diagramas de Nivelamento.

Capítulo 7: Neste capítulo, será realizado análises e discussões relativas aos resultados que serão obtidos no estudo de caso proposto.

Capítulo 8: Contém as considerações finais bem como um resumos sobre as contribuições desta pesquisa.

CAPÍTULO 2 CARACTERÍSTICAS DE UM CANAL DE PROPAGAÇÃO E A LEGISLAÇÃO VIGENTE PERTINENTE AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

As telecomunicações encontram-se inseridas em um ambiente de crescentes inovações e particularmente, dentro da área de rádio propagação, sua notoriedade é cada vez maior para a expansão e popularização dos sistemas de comunicação sem fio. Ao longo do tempo e com o avanço da tecnologia, serviços de comunicações sem fio se mostraram um mecanismo de fundamental importância para a transmissão de informações. A comunicação através de ondas eletromagnéticas (dados, voz ou imagens), sem a necessidade de uso de cabos ou outros elementos de conexão física, tem demandado maior eficiência espectral bem como racionalização de projetos de rádio enlace.

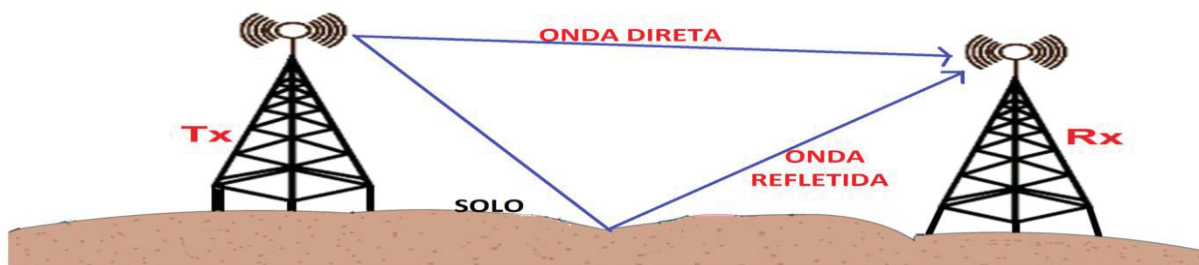
Logo, fica evidenciado uma crescente demanda por diferentes soluções tecnológicas e de engenharia que possibilitem a convivência de inúmeros usuários, em número sempre crescente e com diferentes necessidades, concentrados em uma mesma área geográfica e utilizando faixas do espectro de radiofrequências de forma compartilhada, com serviços e as mais distintas tecnologias (BARCLAY, 2013). Vale destacar que para a concepção de um rádio enlace em diversas faixas de frequência, tal como trata o estudo de caso investigado neste trabalho, faz-se necessária a compreensão dos diversos fatores técnicos envolvidos no projeto. Tais fatores serão abordados e discutidos de maneira generalizada neste capítulo, uma vez que se trata de matéria de conceituação básica.

2.1 CARACTERÍSTICAS DE UM CANAL DE PROPAGAÇÃO

O canal de propagação representa o meio pelo qual ocorre a propagação das ondas eletromagnéticas. Normalmente para *links* de rádio o meio de propagação engloba as condições atmosféricas somadas as características do relevo do terreno e morfologia do ambiente. Dessa forma, o percurso de propagação da onda, entre o transmissor e o receptor pode apresentar, desde uma simples linha de visada direta (sem obstruções no meio), tal como pode ser observado na FIGURA 2, até situações críticas onde existam rigorosas obstruções causadas por obstáculos sólidos tais como

por exemplo, edifícios, construções, elevações do relevo ou algum tipo de vegetação, (SIWIAK, 2007).

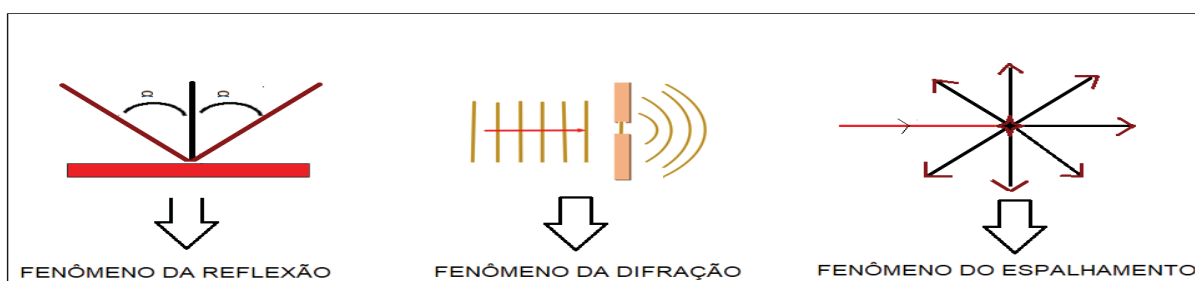
FIGURA 2 – RÁDIO ENLACE SOB LINHA DE VISADA SOFRENDO REFLEXÕES NO SINAL.



FONTE: A autora (2018).

É importante salientar a existência dos fenômenos físicos que, na maioria das vezes, estão presentes no percurso de propagação do sinal, além, obviamente, daqueles naturais, inerentes ao meio. No caso do estudo em questão, os fenômenos de interesse são: a reflexão, a difração e o espalhamento, conforme é apresentado na FIGURA 3.

FIGURA 3 – FENÔMENOS FÍSICOS COMUNS AO MEIO DE PROPAGAÇÃO.



FONTE: A autora (2018).

Normalmente a reflexão pode ocorrer na superfície do solo ou no momento em que uma onda plana encontrar um objeto de dimensões bem maiores, comparando-o ao comprimento da onda incidente. Baseando-se na lei da reflexão conforme a Lei de *Snell*, a direção da onda plana incidente e a direção da onda plana refletida, formam o mesmo ângulo em relação à superfície normal, (THIEL, 2014).

A difração pode ocorrer, usualmente, quando a onda plana atingir um objeto cujas dimensões são da mesma ordem de grandeza do comprimento da onda incidente. Esse fenômeno obedece ao Princípio de Huygens explica a interação da onda plana com o objeto gerador de ondas secundárias, passando a se comportar

como um gerador de novas frentes de onda. Já o fenômeno do espalhamento acontece quando uma onda plana incidir em algum objeto que possui dimensões muito pequenas se comparado ao comprimento de onda original. Nesse caso, o obstáculo dispersivo redireciona a energia da onda plana incidente em várias direções, (ULABY et al., 2015).

2.2 PARÂMETROS QUE ENGLOBAM UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Apesar da influência dos fenômenos físicos existentes dentro e fora do canal de propagação outros aspectos, relevantes, também se associam ao processo de concepção do sistema. São eles, a aplicação da legislação vigente e a aplicação da engenharia tanto no âmbito Microscópico (entraves do sistema) quanto no âmbito Macroscópico (entraves do processo).

- Aplicação da Legislação Vigente - A legislação vigente se faz presente no momento da verificação das normas e recomendações pertinentes a faixa de frequência que se pretende operar, essas condições normativas são definidas pelo órgão regulador, a partir daí, dá-se início ao atendimento dos requisitos da legislação vigente, no Brasil, pela ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. A FIGURA 4, mostra uma síntese resumida dos procedimentos exigidos pelo órgão regulador – ANATEL, (SITAR, 2003).

FIGURA 4 – FORMULÁRIOS EXIGIDOS PELA ANATEL.



FONTE: A autora (2018).

Na maioria das vezes, o projetista de um Sistema de Transmissão deve ter em mente, antes de tudo, que o espectro de frequências é um patrimônio público precioso e cabe ao governo, gerenciador da coisa pública, extrair o máximo de retorno

econômico para a população, (ANATEL, 2012 apud ITU, 2000). Logo, não se pode simplesmente escolher aleatoriamente uma determinada frequência e iniciar-se os procedimentos de cálculo de um sistema, sem que se leve em consideração as restrições ligadas à mesma frequência. Atualmente, existem três grandes grupos de frequências que são as chamadas frequências licenciadas, não licenciadas e de uso restrito:

a). Para o caso de uma faixa licenciada deve-se observar que: a utilização dessa faixa do espectro assegura ao operador a exclusividade de uso, proporcionando uma menor possibilidade de interferência, (ANATEL, 2012):

- i. O usuário que opera em faixas licenciadas tem como vantagem a garantia de uma maior possibilidade de uma boa qualidade do serviço.

Todas as condições de funcionamento de um enlace licenciado estão amparadas e dispostas no Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil (2018), associadas aos diversos serviços e atividades de telecomunicações;

- ii. Toda autorização para utilização do espectro de radiofrequência, será sempre vinculada a um serviço. Sempre que a ANATEL regulamenta uma faixa de frequência são definidos os seguintes requisitos
 - **Atribuição** – Definição clara dos serviços que podem utilizar a faixa;
 - **Canalização** – Definição clara dos canais de frequência dentro da faixa.

b). Para o caso de uma faixa não licenciada, criou-se a forma de uso não-licenciado do espectro com o propósito de evitar sobrecarga de solicitações de licença nos órgãos reguladores, como também facilitar a utilização de RF para aplicações específicas, com baixas potências. Para esse tipo de faixa de frequência, são utilizados equipamentos de radiação restrita, ou seja, equipamentos de radiocomunicação, cujo funcionamento dispensa a autorização para uso de radiofrequência e o licenciamento da estação, pois a baixa potência empregada, em geral, não causa interferência em outros sistemas de RF.

c) A síntese de algumas das principais normatizações e recomendações nacionais e internacionais em vigor para aplicações em Sistemas de Transmissão são listadas e apresentadas na TABELA 1:

TABELA 1 - PRINCIPAIS NORMATIZAÇÕES APLICADAS A PROJETOS DE RADIO ENLACE.

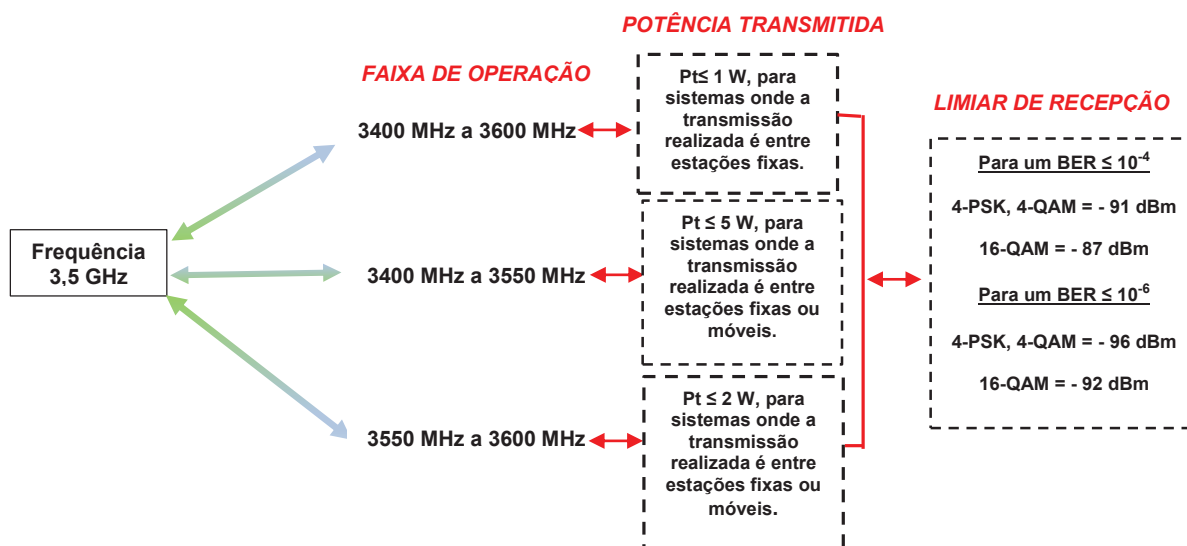
FATORES RELACIONADOS Á PROPAGAÇÃO	
PARÂMETROS	RECOMENDAÇÃO
Atenuação no Espaço Livre	ITU-R 525-2 e ITU-R 341-5
Atenuação devido à Vegetação	ITU-R 833-3
Perdas por Difração	ITU-R 526-5
Atenuação por Gases Atmosféricos	ITU-R 676-3 e ITU-R 676-4
Fator de Curvatura da terra e índices de Refração	ITU-R 453-7 e ITU-R 453-6
Critérios de Liberação de Sinal	ITU-R 530-8
Perda devido à chuva	ITU-R P.837-6
FATORES RELACIONADOS AO EQUIPAMENTO	
PARÂMETROS	RECOMENDAÇÃO
Índices de Qualidade	ITU-R 594-4
Valor de Sistema	ITU-R PN. 837-1
Tipos de Antenas	ETSI TR 102 243-1
Polarização	ITU-R 838
Equipamento Transmissor e Receptor	ETSI TR 102 243-1 ETSI EN 302 217-2-2 ATO DA ANATEL nº 934
Tipos de Cabos	ATO DA ANATEL nº 962
Tipos de Torres	NBR 6123 e NBR 1472
FATORES RELACIONADOS AO SISTEMA	
PARÂMETROS	RECOMENDAÇÃO
Altura de Torre	ITU-R 530-09
Ruído Térmico	ITU-R P.372-10
Ruído devido a Polarização Cruzada e Paralela	Recomendação ITU-R P.530-10
Indisponibilidade do Sistema devido desvanecimento seletivo e não seletivo	ITU-R P.530-17
Disponibilidade	ETSI EN 302 217-1
FATOR PERTINENTE Á CIDADE DE CURITIBA	
PARÂMETROS	RECOMENDAÇÃO
Plano Municipal da Cidade de Curitiba	DECRETO 606

FONTE: A autora (2018).

Dentro do escopo desse trabalho, apresenta-se então uma síntese das principais legislações sobre o uso específico das faixas de frequência licenciadas de 3,5 GHz, 5 GHz, 8,5 GHz, 11 GHz, 18 GHz e 23 GHz e das faixas não licenciadas de 2,4GHz e 5,8 GHz. Percebe-se do exposto que existe então uma legislação específica para a faixa e uma legislação aplicada aos principais elementos constitutivos do enlace. Vale ressaltar, que o critério de escolha para utilização dessas frequências baseou-se principalmente na possibilidade técnica em aplicações do tipo ponto multiponto. Portanto, de acordo com a Coleção Brasileira de Direito das Telecomunicações (2010), as faixas de frequência seguem severas condições de uso e de serviços. Logo, apresenta-se então um resumo das principais legislações:

a). Para frequência de 3,5 GHz – As principais recomendações seguem: a Resolução da ANATEL n°711, Recomendação ETSI EN 301 753, Recomendação ETSI EN 301 216 conforme mostra uma FIGURA 5. O equipamento transmissor e receptor utilizados foram da marca *Analog Devices* no modelo AD9364.

FIGURA 5 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.



FONTE: A autora (2018).

b). Para frequência de 5 GHz – As principais recomendações seguem: a Resolução da ANATEL n°495, Recomendação ETSI EN 301 461, Recomendação ETSI EN 301 216 conforme mostra uma FIGURA 6. O equipamento transmissor e receptor utilizados foram da marca Canopy no modelo WQ-X5Q.

FIGURA 6 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.

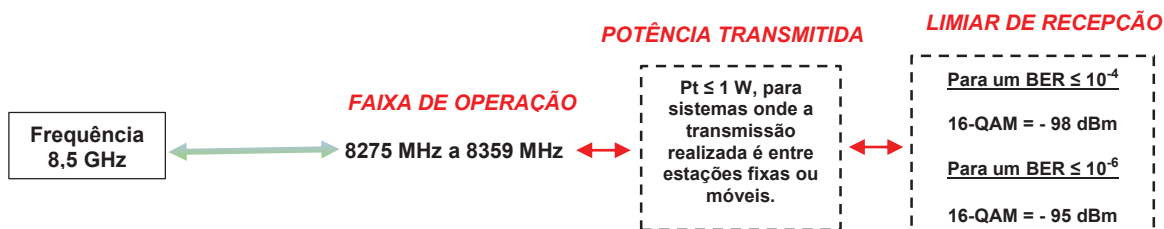


FONTE: A autora (2018).

c). Para frequência de 8,5 GHz – As principais recomendações seguem: a Resolução da ANATEL n°106, Recomendação ETSI EN 301 461 conforme mostra uma FIGURA

7. O equipamento transmissor e receptor utilizados foram da marca *Huawei* no modelo RTN 950.

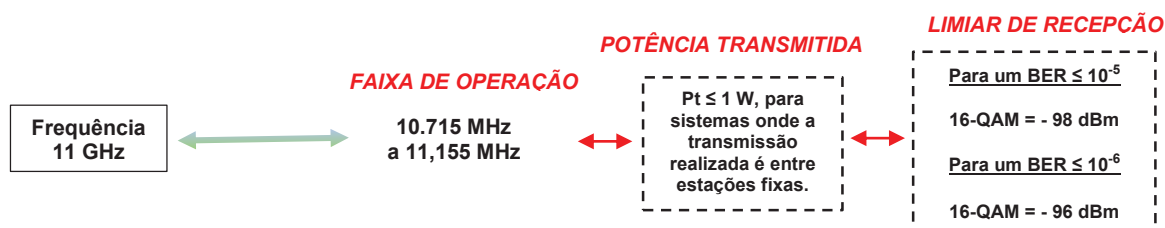
FIGURA 7 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz.



FONTE: A autora, (2018).

d). Para frequência de 11 GHz – As principais recomendações seguem: a Portaria da ANATEL n°605, conforme mostra uma FIGURA 8. O equipamento transmissor e receptor utilizados foram da marca *Huawei* no modelo RTN 950.

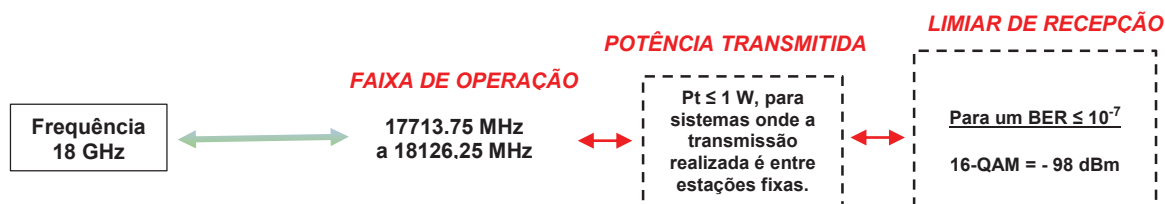
FIGURA 8 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 11 GHz.



FONTE: A autora (2020).

e). Para frequência de 18 GHz – As principais recomendações seguem: a Portaria da ANATEL n°1.288, conforme mostra uma FIGURA 9. O equipamento transmissor e receptor utilizados foram da marca *Huawei* no modelo RTN 310.

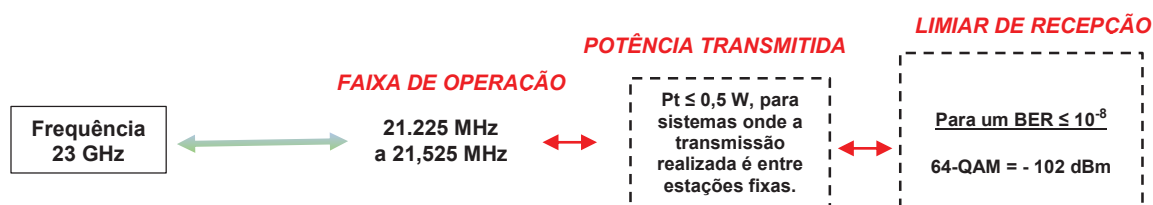
FIGURA 9 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 18 GHz.



FONTE: A autora (2020).

f). Para frequência de 23 GHz – As principais recomendações seguem: a Portaria da ANATEL n°1.120, conforme mostra uma FIGURA 10. O equipamento transmissor e receptor utilizados foram da marca *Huawei* no modelo RTN 310.

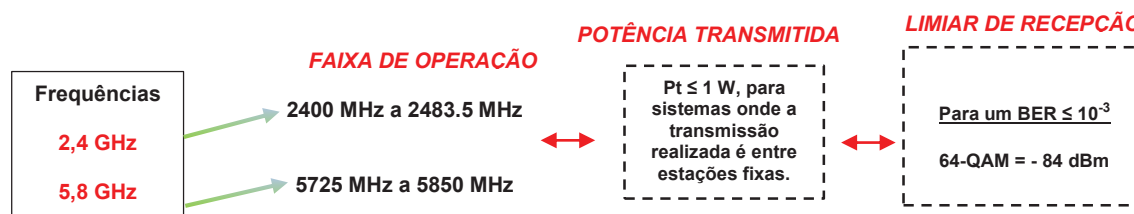
FIGURA 10 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FREQUÊNCIA DE 23 GHz.



FONTE: A autora (2020).

g). Para frequência de 2,4 GHz e 5,8 GHz – As principais recomendações seguem: a Resolução da ANATEL n°680, conforme mostra uma FIGURA 11. O equipamento transmissor e receptor utilizados foram da marca Furukawa no modelo BS1728-G para ambas frequências.

FIGURA 11 - PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES RELATIVAS AS FREQUÊNCIAS DE 2,4 GHz E 5,8 GHz.



FONTE: A autora (2020).

2.3 APLICAÇÃO DA ENGENHARIA

Entende-se por aplicação da engenharia a análise da concepção de um rádio enlace sob dois pontos de vista, chamados de: plano macroscópico e plano microscópico. Sob o ponto de vista macro, entende-se que as seguintes questões devam obrigatoriamente responder:

- i. Quais os desafios que serão enfrentados e os seus porquês?
- ii. Quais as possíveis soluções a estes desafios?
- iii. Quais os resultados esperados?

O plano macroscópico pressupõe, também uma criteriosa análise do plano legislativo e, sobretudo, que o Sistema de Transmissão seja capaz de solucionar os desafios de conectar os diversos usuários com as suas necessidades específicas, quer seja através de conexão ponto a ponto ou ponto multiponto quer seja ponto-área. Segundo Moreno (2006 apud WASHINGTON, 2010), as alternativas de interligação tecnicamente disponíveis são:

- iv. Interligação via Rádio: ocorre quando o projeto realiza-se através de conexão com visibilidade direta (ponto a ponto) ou por meio de pontos de repetição. Nesse tipo de enlace, com interligação via rádio, em média dependendo do projeto, topografia, morfologia e ambiente de propagação, pode alcançar distâncias variáveis entre 50 km a no máximo 100 km com taxas variando entre 10 Mbps a 100 Mbps para qualquer tipo de aplicação.
- v. Interligação via Fibra Ótica: É ideal para usuários que necessitam de altas taxas de velocidade (acima de 100 Mbps).

Já pelo ponto de vista microscópico, entende-se que, uma vez definidos os objetivos a serem cumpridos, a preocupação deva ser de parametrização de todo o conjunto de fatores que levarão a alcançar tais objetivos. E, principalmente, assegurar-se de que haja potência suficiente disponível no receptor, de modo que a comunicação seja estabelecida com níveis de sinal dentro das normas que atendam a legislação. No caso do presente trabalho, será adotado como conhecimento específico uma parametrização combinada entre a potência, frequência, atenuação, ruído e confiabilidade.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, procurou-se sintetizar de forma técnica e legal o que uma concepção de Sistema de Transmissão enseja. De modo sucinto, foi realizado um breve histórico sobre o sistema de rádio enlace, assim como um levantamento sobre as características principais de um canal de propagação. Em seguida, procurou-se enumerar os termos e normas legislativas mais utilizadas na concepção de um Sistema de Transmissão, onde foi enfatizado cada um dos fatores relevantes no projeto.

Os aspectos de concepção, tal como mostrado ao longo do capítulo, serviu para orientar o leitor quanto ao trabalho específico que se pretende desenvolver, ao mesmo tempo em que mostra, o quão complexo este processo pode vir a ser. O objetivo da aplicação das normas legislativas no processo torna-se então mais claro, na medida em que a sua importância tenha sido explicitada.

CAPÍTULO 3 ESTADO DA ARTE

Para embasar a metodologia aplicada na condução da pesquisa, obedecendo as normas do princípio científico, em acordo com as orientações da disciplina de metodologia científica, realizou-se criteriosa pesquisa fundamentada em trabalhos, dos clássicos aos mais atualizados, desenvolvidos na área de radiopropagação, Sistema de Transmissão, modelos de propagação e *softwares* de predição. Todos os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da metodologia também serão abordados de forma detalhada neste capítulo.

3.1 MÉTODO DE COLETA DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

O método de seleção dos artigos foi realizado com auxílio do *software Publish or Perish*, versão 7.18.27. A escolha pelo uso desta ferramenta, primeiramente, advém do fato desta ser uma ferramenta *open source* e também por utilizar como sustentação de pesquisa as informações da base de dados do *Google Scholar* e *Microsoft Academic Search*.

A ferramenta *Publish or Perish* auxilia os autores a verificarem diferentes estatísticas sobre o impacto da pesquisa. Ou seja, através dela é possível calcular as métricas do portfólio bibliográfico tais como: número total de citações, número médio de citações por artigo, número médio de citações por ano, índice H e parâmetros relacionados, (WAICZYK, 2013). Neste trabalho utilizou-se como fonte de pesquisa a base de dados do *Google Scholar*.

Em relação ao critério de seleção de dados procurou-se primeiramente, limitar artigos publicados entre os anos de 2011 a 2020 para assegurar uma grande base de artigos científicos recentes. Em seguida, considerou-se as combinações das palavras chaves associadas ao tema, como *propagation*, *radio link*, *empirical propagation models*, *prediction software*, em conjunto e obtendo-se como resultado 965 artigos como mostra a TABELA 2.

TABELA 2 – MÉTRICAS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

	Início
Período de Publicação	2011 - 2020
Anos de Citação	9
Quantidade de Artigos	965
Citações por ano	19278.38
Citações por Autor	157.37
Artigos por Autor	3.41
Índice H	173

FONTE: A autora (2020).

Com base nestes resultados, deu-se início ao processo de filtragem por fases, como mostra a TABELA 3.

TABELA 3 – MÉTRICAS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO – RESULTADOS DA FASE 1

Filtragem Fase 1	IEEE	Elsevier	Springer	Total de Artigos
Período de Publicação	2011 - 2020	2011 - 2020	2011 - 2020	<u>485</u>
Anos de Citação	9	9	9	
Quantidades de Artigos	340	59	86	
Citações	117.12	865	943	
Citações por ano	146.4	108.5	117.88	
Citações por Autor	43.22	14.66	10.97	
Artigos por Autor	3.73	3.59	3.05	
Índice H	52	17	14	

FONTE: A autora (2020).

A TABELA 3 mostra os resultados referentes ao processo de filtragem na fase 1. Sua finalidade foi selecionar artigos que provinham de fontes seguras e de bases de dados mais relevantes na área da pesquisa, como publicações em jornais ou revistas do IEEE, Elsevier e Springer. Logo, dos 965 artigos coletados inicialmente, foram excluídos aqueles resultantes de fontes menos relevantes e de idiomas diferentes dos relacionados. Obedecendo ao critério estabelecido foram, portanto, selecionados 485 artigos para continuidade do processo.

Na fase 2, deu-se prosseguimento a mais uma filtragem de artigos. Neste ponto, utilizou-se como critério de seleção, os títulos dos artigos que indicavam algum alinhamento com o escopo da pesquisa conforme mostra a TABELA 4.

TABELA 4– MÉTRICAS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO – RESULTADOS DA FASE 2

Filtragem Fase 2	IEEE	Elsevier	Springer	Total de Artigos
Período de Publicação	2011 - 2020	2011 - 2020	2011 - 2020	<u>91</u>
Anos de Citação	9	9	9	
Quantidades de Artigos	40	16	35	
Citações	1079	290	261	
Citações por ano	134.88	36.25	32.63	
Citações por Autor	26.28	18.13	5.22	
Artigos por Autor	3.65	3.50	2.90	
Índice H	10	9	9	

FONTE: A autora (2020).

Após a análise dos resultados mostrados na TABELA 4, foi realizado na fase 3 do processo, uma leitura dos resumos dos 91 artigos selecionados com a finalidade de filtrar apenas aqueles que serviriam de base de fundamentação teórica em relação ao presente trabalho, como pode ser observado na TABELA 5.

TABELA 5– MÉTRICAS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO – RESULTADOS DA FASE 3

Filtragem Fase 3	IEEE	Elsevier	Springer	Total de Artigos
Período de Publicação	2011 - 2020	2011 - 2020	2011 - 2020	<u>26</u>
Anos de Citação	9	9	9	
Quantidades de Artigos	11	3	12	
Citações	78	42	40	
Citações por ano	97.95	5.0	5.71	
Citações por Autor	22.73	13.33	3.33	
Artigos por Autor	3.36	3.67	3.17	
Índice H	7	3	4	

FONTE: A autora (2020).

Como mostra a TABELA 5, na fase 3 de filtragem, foi realizada uma leitura criteriosa na introdução, metodologia e conclusão dos artigos filtrados na fase 2. E a partir disso, foram selecionados 26 artigos para a fase final. O intuito desse procedimento foi o de filtrar apenas os artigos que, de fato, contribuíram com o estudo desenvolvido ao longo dessa pesquisa. Ao final do processo de seleção do portfólio bibliográfico, representado pela filtragem da fase 4, obteve-se 11 artigos relevantes ao presente trabalho e que serão descritos no tópico subsequente.

3.2 ANTERIORIDADE - REVISÃO DA LITERATURA

Aplicando o algoritmo de pesquisa descrito, alguns trabalhos se destacaram como o artigo publicado por Coldrey et al. (2012), titulado por *Small-Cell Wireless Backhauling: A Non-Line-of-Sight Approach for Point-to-Point Microwave Links*, que avalia a viabilidade do uso de frequências em ondas milimétrica pela técnica de *backhaul* em um ambiente sem fio e sem a existência de linha de visada. Nesse artigo foram estudados os seguintes tópicos: os efeitos da frequência portadora, interferência, altura da antena, chuva e tolerância a erros de alinhamento da antena.

Outro artigo semelhante, publicado no jornal IET Microwaves, Antennas & Propagation foi o do Konstantinou et al. (2015) intitulado como *Measurement and modelling of the propagation channel between low-height terminals*, que avalia o desempenho dos sistemas de comunicação através de simulações, onde os

parâmetros considerados para tal análise são, a influência da frequência, o ambiente em que estão inseridos o transmissor e receptor, azimuth, ângulo de elevação e as alturas das antenas.

Focando-se na caracterização dos principais parâmetros que compõem um Sistema de Transmissão, artigos tais como: *Link budget analysis on various terrains using 802.16 WIMAX standard for 3.5 GHz frequency*, publicado por Nalineswar e Rakesh (2015), analisa a propagação em comunicação sem fio considerando parâmetros estruturantes do sistema, as alturas das antenas, perda devido ao cabo e conector, ganho das antenas, atenuação do sinal e a sensibilidade do receptor. Nesse cenário, o padrão 802.16 WIMAX na frequência de 3.5 GHz foi investigado.

Por outro lado, o artigo *Directional Radio Propagation Path Loss Models for Millimeter-Wave Wireless Networks in the 28-, 60-, and 73-GHz Bands*, publicado por Abdulmalik et al. (2016) propõem um estudo referente a um ajuste nos fatores de correção no modelo empírico Stanford University Interim (Sui) e no modelo teórico do espaço livre aplicados em ondas milimétricas em redes sem fio. Esse artigo descreve características de modelos empíricos aplicados a altas frequências, que representa um dos pontos abordados no presente estudo.

Outro artigo que retrata modelos de propagação foi publicado por Anusha et al. (2017) e tem como título *A comprehensive survey of electromagnetic propagation models*, o qual fornece uma análise comparativa entre os principais modelos de propagação. Outro exemplo de artigo relacionado ao tema é *Comparative Analysis of Parabolic Equation Method and Longley–Rice Propagation Model* publicado por Lytaev e Vladyko (2019), que investiga as características do modelo de Longley – Rice e o método determinístico da equação parabólica sob várias condições de propagação, evidenciando as vantagens e desvantagens de cada uma.

O artigo de autoria de Abughalia, Ahsan e Saha (2019) intitulado como *Comparative Study of Microcell's Performance using Different Models in Different Regions*, também tem como pauta a discussão de modelos empíricos (Sui e Ericsson) aplicados em ambientes diferentes com a finalidade de se analisar a perda de sinal em micro células. Utilizaram como ferramenta computacional o *MATLAB*.

Outro ponto pertinente para o desenvolvimento desta pesquisa foi justamente, a análise do impacto dos fatores atmosféricos em relação a ondas milimétricas. Logo, o artigo publicado no jornal IEEE Access, *Real Measurement Study for Rain Rate and*

Rain Attenuation Conducted Over 26 GHz Microwave 5G Link System in Malaysia, publicado por Shayea et al. (2018) que realiza uma abordagem sobre medições reais que investigam o impacto da chuva na propagação de ondas milimétricas especificamente na frequência de 26 GHz.

Um outro artigo que retrata fatores atmosféricos foi publicado pela revista Springer, *Precipitation and other propagation impairments effects at microwave and millimeter wave bands: a mini survey* feito por Kotamraju e Korada (2019) descrevem os efeitos da chuva, nuvens, neblina, gelo e granizo para faixas de frequência acima dos 10 GHz.

Com o intuito de realizar comparações da metodologia desenvolvida neste trabalho em relação a *softwares* de predição já existentes, artigos como a Popoola et al. (2017) titulado *Standard Propagation Model Tuning for Path Loss Predictions in Built-Up Environments*, retrata um procedimento de otimização que utilizou o *software* de predição ATOLL em relação ao modelo de propagação Standard Propagation Model - SMP. Já o artigo publicado por Kaschel et al. (2019), nomeado *Modeling and Simulation of the ITM Model for Point to Point Prediction on Digital Television Extensible to other Technologies*, descreveu e analisou os coeficientes e o perfil do algoritmo por traz do *software* de predição *Radio Mobile*. Este artigo, contempla uma análise referente ao modelo que o *software* utiliza e as irregularidades do terreno.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Buscou-se ao longo deste capítulo detalhar o processo científico metodológico adotado em relação ao levantamento do estado da arte, assim como apresentar os artigos que foram selecionados como pontos de referência de base teórica para o desenvolvimento desse estudo.

Os artigos selecionados para compor a fundamentação teórica deste estudo, de uma maneira geral, abordaram análises de parâmetros que estruturam um Sistema de Transmissão, bem como as principais características que descrevem o funcionamento de um *link*. Observou-se também, diferentes abordagens realizadas nos trabalhos lidos, como aplicações para diferentes cenários e para distintos modelos de propagação onde os principais resultados, foram obtidos através de simulações realizadas principalmente por *softwares* de predição tradicionais. Diferentemente da

proposta do presente trabalho, em que será utilizada uma interface gráfica original aplicada em uma ferramenta de simulação própria, para análise dos resultados de um Sistema de transmissão. Vale ressaltar, que não foram encontrados artigos na literatura técnico-científica que retrata-se o método proposto do presente trabalho.

CAPÍTULO 4 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Até recentemente o espectro de SHF (*Super High Frequency*), era relativamente pouco utilizado em aplicações de serviços fixos, estes serviços ocupavam fundamentalmente a banda inferior a 3 GHz. A partir de meados dos anos 80, a banda de frequência designada aos serviços fixos começou a se tornar congestionada e o surgimento de uma demanda elevada por novos serviços que exigiam altas taxas de transmissão, motivou as operadoras e entidades reguladoras responsáveis a expandir o uso da faixa do espectro normatizando a faixa de SHF para serviços móveis e fixos, (GIBBINS, 1900; STAHLKE, 2006).

De acordo com Sizun (2005), diante deste novo cenário os sistemas de transmissão na banda SHF deveriam oferecer estabilidade e serem capazes de atingir o mesmo nível de disponibilidade e desempenho, e relação aos sistemas que operavam em bandas mais baixas do espectro. Surgiu então novos desafios e necessidades a serem supridas que demandou o uso intensivo de novos modelos de propagação bem como a consolidação de modelos pré-existentes mais pouco explorados, que uma vez aplicados ao sistema são determinantes para estimar o efeito das características dos mecanismos de propagação em relação ao desempenho do sistema.

Logo, torna-se imprescindível que tais modelos de propagação, também conhecidos como modelos de predição, retratem a realidade de funcionamento do sistema o mais próximo possível do real e que, ao mesmo tempo, se tornem ferramentas indispensáveis ao planejamento de um Sistema de Transmissão. Aspectos como descrição dos tipos de ambiente, conceituação matemática dos modelos de propagação estudados, neste trabalho, serão os assuntos discutidos ao longo deste capítulo.

4.1 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

A finalidade dos modelos é prever, estocasticamente, qual o comportamento do sinal no ambiente de propagação. Com esse propósito várias técnicas foram desenvolvidas ou aprimoradas, com abordagens distintas, as quais incluem as abordagens empíricas, determinísticas, estatísticas e híbridas.

- Modelos Empíricos são amplamente utilizados, por oferecerem resultados eficientes e necessitarem de pouco processamento computacional. São modelos matemáticos que simulam o comportamento da propagação de um sinal em um determinado meio. A eficácia de um modelo pode ser confirmada por medições após a implementação do *link*. São caracterizados também, por oferecerem ajustes mais simples em suas curvas e pela possibilidade da introdução de fatores de correção nas equações constitutivas resultando na possibilidade de contabilização de todos os fatores que interferem na propagação do sinal.

A eficiência de um modelo depende da frequência e das diferentes características do ambiente. Por serem modelos baseados em condições específicas ou com determinadas particularidades a serem consideradas. Os modelos empíricos tendem a não fornecer resultados muito confiáveis, quando aplicados a regiões que difiram significativamente daquelas que não atendam aos parâmetros da premissa básica, ou seja, os modelos empíricos fornecem melhores resultados quando não existem divergências significativas nos fatores considerados em sua formulação matemática, (DEMINCO, 2003).

- Modelos Determinísticos (Teóricos) fazem uso da Teoria de Propagação no Espaço Livre, da teoria da difração eletromagnética (a GTD *Geometrical Theory of Diffraction*) bem como da UTD (*Uniform Theory of Diffraction*) que podem ser utilizadas para, por exemplo, determinação do cálculo de cobertura de uma região. O uso da teoria eletromagnética proporciona aos modelos determinísticos grande vantagem em termos de confiabilidade dos valores calculados. Outra característica desses modelos, é o fato de serem aplicados, sem maiores restrições, aos mais variados tipos de ambientes e morfologias da região. Têm como principal desvantagem a maior dificuldade de implementação em relação aos modelos empíricos, bem como a exigência de recursos computacionais significativamente maiores, (SON, 1999).

- Modelos Estatísticos - representam uma forma de calcular o comportamento aleatório do sinal devido as rápidas flutuações nas amplitudes, fases ou atrasos de multipercurso do sinal, caracterizando o chamado desvanecimento de pequena escala (causado devido a distâncias curtas ou a um curto intervalo de tempo). Portanto, esses modelos consideram em seu modelamento a natureza dos efeitos dos vários múltiplos percursos, suas perdas e principalmente a influência que estes fatores podem produzir no sinal recebido. Vale salientar que, o que caracteriza esses modelos são os

resultados fornecidos, uma vez que podem ser interpretados como eventos aleatórios que ocorrem em uma dada probabilidade. De certa forma, podem ser considerados como modelos matematicamente mais elaborados do que os modelos empíricos. Sua desvantagem está no fato de que sua implementação exige um rigoroso e minucioso detalhamento, e precisão das informações de topografia e morfologia sobre a região de cobertura. Exemplos destes modelos são: Rice, Rayleigh, Nakagami – m, dentre outros, (YACOUB, 2002).

- Modelos Híbridos estão sendo bastante utilizados nos últimos anos, principalmente por contemplarem, na concepção da formulação matemática, tanto perspectivas empíricas quanto estocásticas. Esses modelos apresentam maior flexibilidade, pois, mesclam teoria e dados estatísticos derivados de medições ou previsões. Ou seja, existe a possibilidade de introduzir no processo de modelamento medidas reais no ambiente de propagação. Desse modo, reduz-se o erro entre a estimativa prevista pelo modelo de propagação e a realidade. Vale lembrar, que não existe ainda um modelo de aplicação genérico e amplo para todos os tipos de ambientes, frequências e parâmetros, (BLAUNSTEIN, 2000).

Neste estudo, optou-se por se trabalhar com três modelos empíricos e um determinístico, os quais utilizam métodos matemáticos menos complexos de análise. Esta escolha deve-se ao fato, de que o principal objetivo desse trabalho é validar a metodologia proposta através de modelos já fundamentados na literatura e não um estudo aprofundado em diversidade de modelos mais específicos.

4.1.1 Tipos de Ambientes

Segundo Blaunstein (2000), ao se utilizar modelos empíricos faz-se necessário saber o tipo de ambiente, no qual o enlace estará inserido. Usualmente os ambientes são categorizados em três tipos básicos ou regiões de propagação: urbana, suburbana e rural. A classificação de ambientes considera, dentre outros, alguns elementos como:

- Ondulação do terreno;
- Densidade da vegetação;
- Densidade e altura dos edifícios;
- Existência de áreas abertas;

- Existência de superfícies aquáticas.

Um dos elementos mais relevantes do ambiente, em regiões urbanas, é a presença de edificações, que são responsáveis pela ocorrência de reflexões e espalhamentos, ocasionando possíveis desvanecimentos no sinal, além de produzir zonas não iluminadas conhecidas como áreas de sombreamentos (grande causadora de atenuações e *fadings*). Os fenômenos de atenuação causados por reflexões e espalhamentos variam de acordo com o adensamento e tipos de materiais utilizados nas edificações.

Devido a tais características, a tarefa de se avaliar um modelo de propagação será sempre uma missão complicada, pelo fato de sempre ocorrerem desvios significativos entre a previsão do modelamento do sinal e a realidade obtida posteriormente à implementação do sistema.

4.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO UTILIZADOS

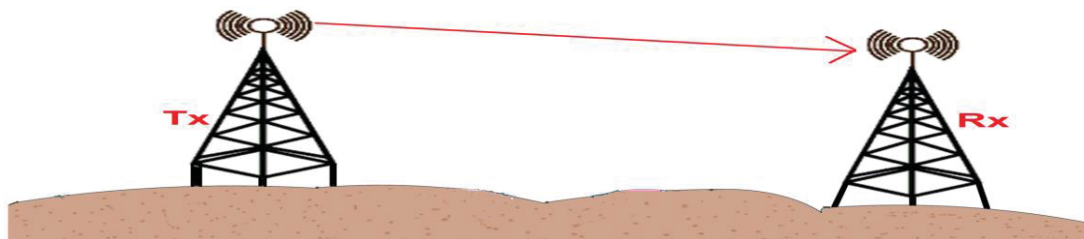
Os fenômenos mais importantes relacionados à propagação são os seguintes: a atenuação no espaço livre, atenuação por gases da atmosfera (incluindo o vapor d'água), perdas adicionais causadas por chuvas, reflexão na superfície do solo, reflexões devido a obstáculos e elevações, difração e perdas devido a topografia do terreno, refrações na atmosfera e na ionosfera. A análise de todos estes fatores, induz à conclusão de que, quando o sinal se propaga, existe uma alta probabilidade de que ele chegue com razoável atenuação no receptor, (COLLIN, 1985). Como dito anteriormente, os modelos de propagação servem para prever o comportamento do sinal ao longo do percurso. Neste estudo, serão utilizados os modelos do Espaço Livre, Longley Rice, Stanford University Interim - Sui e Ericsson 9999 para as análises.

4.2.1 Modelo do Espaço Livre

O Modelo do Espaço Livre representa um modelo clássico determinístico utilizado, quando existe linha de visada livre entre o transmissor e o receptor, aplicável tanto para enlaces terrestres de micro-ondas como via satélite. O ambiente de propagação deve ser homogêneo e com ausência de obstáculos, como mostra a FIGURA 12, que possam causar algum tipo mudança no comportamento do sinal,

desprezando-se o fenômeno da difração. Segundo este modelo, a potência do sinal recebido varia inversamente com o quadrado da distância, a partir do transmissor; o seu valor é obtido pela fórmula de FRIIS. É pertinente afirmar que embora este modelamento tenha por base uma condição idealizada, a propagação em espaço livre possui aplicação prática bastante relevante, em particular para frequências elevadas, tornando o seu entendimento e cálculos, úteis para que sejam desenvolvidas expressões mais complexas e que possam melhor definir a propagação em diferentes ambientes, (FRIIS 1946; PARSON, 2000).

FIGURA 12- MODELO DO ESPAÇO LIVRE SOB LINHA DE VISADA DIRETA.



FONTE: A autora (2018).

Este modelamento serve de referência para outros mecanismos de propagação, . Tal formulação é dada pela expressão (1).

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

onde, P_r é a potência recebida [W], P_t é a potência da antena transmissora [W], G_t e G_r representam os ganhos adimensionais das antenas de transmissão e recepção, respectivamente, L corresponde as perdas ôhmicas (de descasamento, polarização, e desalinhamento das antenas) e finalmente λ representa o comprimento de onda do sinal transmitido [m]. Com manipulação algébrica, expressando a frequência em mega-hertz ou giga-hertz, a distância em quilômetros, obtém-se a atenuação em [dB] que são expressas por (2) e (3) respectivamente.

$$EL = 32,44 + 20 \log (fMHz) + 20 \log (d) [dB] \quad (2)$$

$$EL = 92,44 + 20 \log (fGHz) + 20 \log (d) [dB] \quad (3)$$

Onde, d representa a distância entre as estações em [km].

4.2.2 Modelo *Longley Rice*

O modelo *Longley Rice* também é conhecido como modelo de terreno irregular ITS (Irregular Terrain Model), representa um modelo empírico que tem a finalidade de obter um modelamento do canal preciso, em relação as características do meio. Neste modelo, considera-se a média das perdas do sinal percorrido, em transmissões sobre terrenos irregulares. Este método é embasado na teoria básica de propagação de onda eletromagnética, na intercorrência do sinal como função do clima, posicionamento das estações e, também, em um grande número de medições em campo. É apropriado para faixas de frequência entre 20 MHz a 20 GHz em terrenos com perfis detalhados ou em terrenos com uma característica média representativa, (SHUMATE, 2010).

Existem três dimensões que compõem a intercorrência do sinal que incluem os fenômenos físicos e estatísticos associados, os quais equivalem, ao percentual do tempo em que o *link* não extrapola um determinado valor de atenuação representado pela variável Y_L , ao percentual referente a localização dos percursos onde ocorre a degradação representado pela variável Y_S e ao percentual de áreas em regiões similares que enfrentam perda relativa ao sinal em propagação representado pela variável Y_T , (LONGLEY;RICE,1968).

A atenuação de referência do percurso em [dB] é definida pelas expressões (4), (5) e (6) que apresentam um termo relativo à atenuação no espaço livre representado pela variável A_{EL} , outro relacionado aos mecanismos de propagação (tópico discutido anteriormente no item 2.3 do Capítulo 2) como linha de visada representada pela variável A_{LOS} , difração representado pela variável A_{dif} e espalhamento representado pela variável A_{es} . Ou seja, cada região contribui com um comportamento diferente em relação ao efeito sobre a propagação, tal como descrito na TABELA 6.

TABELA 6 – REGIÕES DE ATENUAÇÃO DO MODELO *LONGLEY - RICE*

Região	Descrição
Linha de Visada - A_{LOS}	Região sem obstrução de obstáculos. Calculada como uma função direta da distância entre as estações.
Difração - A_{dif}	Caracteriza a região de aumento bastante rápido da atenuação.
Espalhamento - A_{es}	Caracteriza o efeito dos fenômenos dispersivos do sinal eletromagnético e ocorre de forma mais lenta.

FONTE: Adaptado de Amaral (2012).

Logo tem-se:

$$RC = \begin{cases} A_{EL} + A_{LOS} + (Y_L + Y_S + Y_T), \text{ para } d < d_{lb}, & (4) \\ A_{EL} + A_{dif} + (Y_L + Y_S + Y_T), \text{ para } d_{lb} \leq d \leq d_{lm}, & (5) \\ A_{EL} + A_{es} + (Y_L + Y_S + Y_T), \text{ para } d_{lm} < d & (6) \end{cases}$$

Onde, d representa a distância entre o transmissor e o receptor em [km], d_{lb} representa a linha de visada do rádio da antena transmissora em [km] e d_{lm} representa a linha de visada do rádio da antena receptora em [km].

Os coeficientes de atenuação A_{LOS} , A_{dif} e A_{es} são determinados a partir das equações (7), (8), (9), (10) e (11).

$$A_{LOS} = 20 \log \left(1 + \frac{(d_{lb} + d_{lm}) \Delta h}{h_{eb} h_{em}} \right) \quad (7)$$

$$A_{dif} = \left(1 + 0.045 \left(\frac{\Delta h}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{a \theta_e + (d_{lb} + d_{lm})}{d} \right)^{1/2} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$A_{es} = H_0 + 10 \log(f \theta_e^4) - 0.1(N_s - 301) e^{\left(\frac{-\theta_e d}{40} \right)} \quad (9)$$

$$a = \frac{6370}{(1 - 0.04665 e^{0.005577 N_s})} \quad (10)$$

$$H_0 = \frac{(h_{eb}^{-1} + h_{em}^{-1})}{\theta_e f \| 0.007 - 0.058 * \theta_e \|} \quad (11)$$

Onde:

f – é a frequência de operação em [MHz];

λ – representa o comprimento de onda em metros;

h_{eb} e h_{em} – representam as alturas das antenas transmissora e receptora em metros respectivamente;

θ_e – representa o ângulo do cruzamento dos horizontes do rádio das antenas do *link*;

Δh – representa a irregularidade do terreno;

N_s – é o índice de refatividade da superfície.

As distâncias d_{lb} e d_{lm} , podem ser estimadas estatisticamente em função da irregularidade do terreno (Δh) e das alturas efetivas das antenas. Na condição em que exista o perfil detalhado do terreno, os parâmetros do trajeto de propagação podem ser definidos com maior facilidade (PARSONS, 2000). Os valores típicos do

irregularidade do terreno (Δh) para diferentes tipos de terrenos podem ser observados na TABELA 7.

TABELA 7 –VALORES ESTIMADOS PARA IRREGULARIDADE DO TERRENO

Tipo de Terreno	Δh
Água ou Planícies muito lisas	0 a 50
Planícies	30
Colina	80 a 150
Montanhas	150 a 300
Cordilheiras	300 a 700

FONTE: Parsons (2000)

Dispondo-se dos valores de Δh pode-se calcular através das expressões (12) e (13) os valores de d_{lb} e d_{lm} em [km], (PARSONS, 2000).

$$d_{lb} = \sqrt{17h_{eb}} e^{\left(-0,07\left(\sqrt{\frac{\Delta h}{h_{eb}}}\right)\right)} \quad (12)$$

$$d_{lm} = \sqrt{17h_{em}} e^{\left(-0,07\left(\sqrt{\frac{\Delta h}{h_{em}}}\right)\right)} \quad (13)$$

Os ângulos de elevação, em radianos, também são necessários para o cálculo dos coeficientes de atenuação e podem ser obtidos a partir das equações (14), (15) e (16).

$$\theta_{eb} = \frac{0,0005}{\sqrt{17h_{eb}}} \left(1,3 \left(\frac{\sqrt{17h_{eb}}}{d_{lb}}\right) \Delta h - 4h_{eb}\right) \quad (14)$$

$$\theta_{em} = \frac{0,0005}{\sqrt{17h_{em}}} \left(1,3 \left(\frac{\sqrt{17h_{em}}}{d_{lm}}\right) \Delta h - 4h_{em}\right) \quad (15)$$

$$\theta_e = (\theta_{eb} + \theta_{em}) \quad (16)$$

O índice de refatividade da superfície (N_s) é outra variável considerada e depende das condições atmosféricas do ambiente que interferem no índice de refração do meio e provocam o desvanecimento dos sinais eletromagnéticos na troposfera, como temperatura, pressão e umidade relativa (LONGLEY; RICE, 1968).

A TABELA 8 mostra valores retirados de um mapa de refratividade proposto pelo próprio modelo:

TABELA 8 – REFRATIVIDADE DA SUPERFÍCIE

Tipo de Clima	N _s
Deserto	280
Continental Temperado	301
Continental Subtropical	320
Marítimo Temperado	320
Marítimo Temperado sobre o Mar	350
Equatorial	360

FONTE: Longley e Rice (2000).

4.2.3 Modelo *Sui*

A equipe de trabalho 802.16 do IEEE vem desenvolvendo padrões em sistemas de banda larga. Para frequências de operação limitadas a no máximo 11 GHz, esta equipe criou modelos de canal, conhecidos como Modelos *Sui - Stanford University Interin*, (CASTRO et al., 2010). Este modelo é aplicado basicamente para 3 tipos de ambiente denominados A, B e C. O ambiente tipo A é relativo às regiões de relevos acidentados e intensa vegetação. O ambiente tipo C é adequado para regiões de terreno plano que possuem densidades de vegetação leve. E o ambiente tipo B é intermediário entre os tipos de ambiente A e C. A perda de propagação no modelo *Sui* é dada pelas equações (17), (18), (19), (20), (21) e (22).

$$PL_{Sui} = A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \Delta L_f + \Delta L_h + S \quad (17)$$

onde $d > d_0$, onde:

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (18)$$

$$\gamma = a - b h_b + \frac{c}{h_{eb}} \quad (19)$$

$$\Delta L_f = 6 \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \text{ para terrenos A e B} \quad (20)$$

$$\Delta L_h = -10,8 \log_{10} \left(\frac{h_{em}}{2} \right) \text{ para o terreno C} \quad (21)$$

$$S = 0,65(\log(f))^2 - 1,3 + \log(f) + \alpha \quad (22)$$

Onde:

f – é a frequência de operação em MHz;

d_0 – representa a distância de referência (100 metros);

ΔL_f – representa o fator de correção da frequência;

ΔL_h – representa o fator de correção da altura da antena no receptor;

h_{eb} e h_{em} – representam as alturas das antenas em metros;

S – representa o efeito do sombreamento, considerando que α vale 5,2 para ambientes urbanos e suburbanos e 6,6 para o ambiente rural;

γ – representa o expoente de perda de propagação para os diferentes tipos de terreno, definidos pelas variáveis a, b e c como mostra a TABELA 9.

TABELA 9 – VARIÁVEIS REFERENTES AOS TIPOS DE TERRENOS

Variáveis	Terreno do tipo A	Terreno do tipo B	Terreno do tipo C
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20

FONTE: Basu et al. (2016).

4.2.4 Modelo *Ericsson 9999*

O último modelo empírico a ser abordado neste capítulo é o *Ericsson 9999*. Existiram muitas sugestões para melhorar os modelos *Okumura-Hata* e *Cost 231-Hata*, considerando o ambiente de propagação. Um deles foi este, que foi criado por engenheiros da própria companhia (ELNASHAR et al., 2014). Desenvolvido inicialmente para operar na faixa de frequência de 150 MHz a 2 GHz, hoje, é possível estender sua aplicabilidade para faixas superiores por meio de ajustes dos parâmetros. Este cálculo pode ser obtido pelas equações (23) e (24):

$$P_{ERI} = a_0 + a_1 \log_{10}(d) + a_2 \log_{10} h_{em} + a_3 \log_{10} h_{eb} \log_{10}(d) - 3,2(\log_{10} 11,75 h_{em})^2 + g(f) \quad (23)$$

$$G(f) = 44,9 \log_{10}(f) - 4,78 \log_{10}(f) \quad (24)$$

Onde:

a_0 , a_1 , a_2 e a_3 – representam as constantes que podem ser modificadas de acordo com o cenário em análise. Os valores padrão dessas constantes estão mostrados na TABELA 10.

TABELA 10 - VALORES PADRÃO DE ACORDO COM O CENÁRIO DE ESTUDO

Ambientes	a_0	a_1	a_2	a_3
Urbano	36,2	30,2	12	0,1
Suburbano	43,20	68,93	12	0,1
Rural	45,95	100,6	12	0,1

FONTE: Simi (2001).

4.3 SOFTWARES DE PREDIÇÃO TRADICIONAIS

A utilização de recursos computacionais está difundida em todas as áreas da engenharia, trazendo confiabilidade e rapidez para os projetos através de simulações cada vez mais realistas. O modelamento de projetos embasados em simulações resulta em vantagens como a diminuição de custos dos protótipos e segurança contra erros que podem ocorrer no ambiente real de operação. Na área de telecomunicações, essa prática é usual pois permite simulações de sistemas complexos, facilitando o processo de implementação e reduzindo os custos.

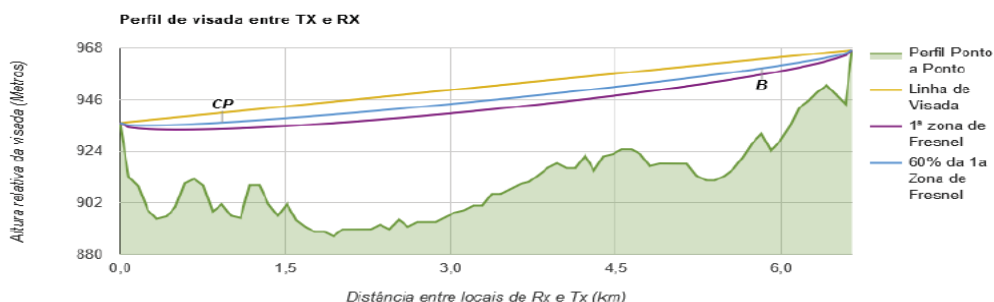
Aqui serão descritos as características dos *softwares Radio Mobile* e *LinkCalc* os quais são ferramentas *open source* utilizados para fins acadêmicos e profissionais. Eles oferecem fácil entendimento em relação aos seus recursos e funcionalidades. O processo de validação da metodologia proposta, neste trabalho, foi realizado através do auxílio das ferramentas computacionais citadas anteriormente.

4.3.1 Software Radio Mobile

O Radio Mobile é uma ferramenta que foi desenvolvida pelo engenheiro canadense Roger Coudé (SALAMANCA et al., 2012). Sua estrutura utiliza a base de dados de altimetria SRTM ou missão topográfica radar *Shuttle*. A finalidade do programa é realizar a predição de cobertura de sistemas de radiocomunicação fixo e móvel, com aplicação em sistemas ponto a ponto e ponto-multiponto. Além disso, esse *software* considera nas suas simulações a topografia da região, incluindo alguns aspectos morfológicos, que representa um fator importante para predições mais realistas. A FIGURA 13 mostra a interface da ferramenta.

FIGURA 14 - TELA DOS RESULTADOS OBTIDOS PELA FERRAMENTA *LINKCALC*.

Informações do Local			
Nome do Local TX	CP	Nome do Local de RX	B
Tipo de rádio	LigoPTP 5-23 RapidFire	Tipo de rádio	LigoPTP 5-23 RapidFire
Latitude	-25.451	Latitude	-25.433
Longitude	-49.234	Longitude	-49.297
Potência TX	28.0 dBm	Limite de RX	-96.0 dBm
Ganho da Ant.	27.0 dBi	Ganho da Ant.	28.0 dBi
Altura da Ant.	20.0 metros	Altura da Ant.	25.0 metros
Parâmetros			
Frequência	5000.0 MHz	Clima	Unknown
Polarização da Ant.	Horizontal	Sistema de medidas	Sistema métrico
Perdas Diversas	0.0 dBm	Taxa de chuva	0.0 mm/hr
Resultados			
Perdas Espaço Livre	123 dB	Margem de esmaecimento térmico	56 dB
Nível de sinal de RX	-39.764 dBm	Distância Entre Locais	6.646 km
E.I.R.P.	55.0 dBm	Disp. Durante a Chuva	N/A



FONTE: *LigoWave - LinkCalc* (2020).

Neste trabalho também utilizou-se a ferramenta *LinkCalc*, a qual permite gerar simulações em tempo real para *links* do tipo ponto - a - ponto. Essa ferramenta possibilita ao usuário verificar resultados, tais como: a localização geográfica das estações, distância do *link*, nível de recepção, atenuação no espaço livre, atenuação total do *link* e a confiabilidade final do sistema.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais modelos de propagação de RF presentes na literatura científica, a partir dos quais os modelos mais recentes vêm sendo pesquisados, desenvolvidos e aplicados à ferramentas computacionais comerciais. Os conceitos e definições da problemática de perdas que ocorrem no canal de propagação, formam o alicerce básico na concepção das ferramentas de predição de cobertura de RF e, neste trabalho, todos os modelos aqui descritos são parte integrante da metodologia de desenvolvimento desta pesquisa.

Outro ponto pertinente, foram a descrições dos *softwares* de predição que serão utilizados neste trabalho como métricas comparativas.

CAPÍTULO 5 PARÂMETROS DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Quando a ideia é a de implantar um sistema, deve-se levar em consideração parâmetros relevantes que garantam um desempenho satisfatório do *link*. Pode-se afirmar que a simples ideia de concepção de um Sistema de Transmissão passa tanto pelo entendimento de seus diversos fatores constitutivos, quanto pelo entendimento de uma análise de engenharia através de uma metodologia de concepção e do conhecimento da legislação vigente.

5.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O projeto de dimensionamento do sistema, no presente capítulo, terá premissa de interligação via rádio. O desafio deste tipo de interligação reside no problema de visibilidade das antenas, pois interligações via rádio são susceptíveis a interferências, além de problemas com possíveis obstruções. As etapas do projeto que dimensionarão o Sistema de Transmissão estão relacionados a elementos vinculados a: Geometria, Frequência, Potência, Interferência (Ruídos) e Confiabilidade do enlace.

5.2 PARÂMETROS DE GEOMETRIA

Determinar a geometria de um rádio enlace significa explicitar a sua estrutura física, ou seja, determinar onde as torres serão colocadas, qual o tipo de antena que será utilizada no projeto, os cálculos de azimutes e dos ângulos de elevação, o cabeamento do sistema, a distância que o sinal deverá percorrer além das considerações sobre a elevação do terreno, (MORALES, 2010).

1) O primeiro passo de concepção é determinar a latitude e longitude das antenas transmissoras e receptoras respectivamente daquele sistema em graus decimais, sua expressão é dada pela equação (25).

$$\text{Graus decimais} = \text{Graus} + \frac{\text{minutos}}{60} + \frac{\text{segundos}}{3600} \quad (25)$$

2) A distância ortodrômica será definida, uma vez que a latitude e a longitude das estações sejam determinadas, calcula-se a distância linear entre os dois pontos, e essa distância é conhecida como ortodrômica expressa pelas equações (26) e (27):

$$d = 111,276 \cdot \arccos(\{\sin(\text{lat}A) \sin(\text{lat}B) + \cos(\text{lat}A) \cos(\text{lat}B) \cos(\text{long}A - \text{long}B)\}) \text{ [km]} \quad (26)$$

$$\Delta = \arccos\{\sin(\text{lat}A) \sin(\text{lat}B) + \cos(\text{lat}A) \cos(\text{lat}B) \cos(\text{long}A - \text{long}B)\} \text{ [graus]} \quad (27)$$

Onde a *Lat A* e *Long A* representam as coordenadas geográficas da estação A; *Lat B* e *Long B* representam as coordenadas geográficas da estação B e Δ representa a distância ortodrômica dada em graus.

3) A determinação da altitude do terreno, no qual se colocará a torre, pode ser obtida das seguintes formas:

- a. Pela utilização de um GPS;
- b. Através das facilidades da ferramenta de internet *Google Maps*.

Para esta análise foi utilizado para a determinação da altitude do terreno a ferramenta de internet *Google Maps*.

4) O cálculo do azimuth tem por finalidade alinhar as antenas na mesma direção, transmissão/recepção de maior potência irradiada. Para tal, torna-se necessário calcular o ângulo entre o norte e a linha de visada da estação de menor longitude. As equações (28), (29) e (30) permitem o cálculo do Azimute.

$$A_{zA} = \arccos \left\{ \frac{\sin(\text{lat}B) - \cos(\Delta) \sin(\text{lat}A)}{\sin(\Delta) \cos(\text{lat}A)} \right\} \quad (28)$$

$$A_{zB} = 180^\circ + A_{zA} \quad (29)$$

$$A_{zB} = 360^\circ - \arccos \left\{ \frac{\sin(\text{lat}B) - \cos(\Delta) \sin(\text{lat}A)}{\sin(\Delta) \cos(\text{lat}A)} \right\} \quad (30)$$

Onde, A_{zA} refere-se ao Azimute da Estação A e A_{zB} refere-se ao Azimute da Estação B.

5) O cálculo do ângulo de elevação indica a inclinação necessária que à antena deve possuir em relação ao seu posicionamento. Uma vez obtido o ângulo de elevação, procede-se à regulação da antena utilizando a escala graduada geralmente na parte de trás da antena, a equação (31) expressa este cálculo.

$$AE = \tan^{-1} \left[\frac{\left(\cos \frac{\Delta}{4} - 1 \right)}{\left(\sin \frac{\Delta}{4} \right)} \right] \quad (31)$$

Onde, Δ é a distância ortodrômica, conforme foi definida na equação (27).

5.3 PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA E PROPAGAÇÃO

A frequência, que será utilizada no enlace, é basicamente determinada em função do tipo de serviço, que se pretende utilizar. A partir da escolha da frequência, pode-se definir os cálculos referentes ao ganho das antenas, as perdas devido aos tipos de cabo e conectores e, finalmente, determinar-se as atenuações naturais do sistema, (CESAR; GOMES, 2003).

6) A Justificativa para a Escolha das Antenas baseia-se na recomendação da Anatel (2010), e na recomendação do ETSI TR 102 243-1. Logo, as escolhas das antenas seguiram os seguintes critérios:

- Modelos de antenas de um mesmo fabricante, ganho e discriminação angular.

Foram vários os tipos de antenas consultadas por pesquisa de internet e catalogo de fabricantes e várias antenas correspondem aos critérios estabelecidos. Escolheram-se então 16 antenas da RF - Engineering & Energy Resource, suas características técnicas foram sumarizadas nas TABELAS 11, 12 e 13:

TABELA 11 – ANTENAS UTILIZADAS NAS FREQUÊNCIA DE 2,4 GHz, 3,5 GHz E 5 GHz.

<i>Especificações elétricas para frequência de 2,4 GHz</i>	
Frequência	2,4 GHz
Modelo de Antena JRB15 – Ganho _{TX}	17 dBi
Modelo de Antena JRB17 – Ganho _{RX}	18 dBi
VSWR _{TX}	1,5
VSWR _{RX}	1,2
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	29° (JRB - 15)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	33° (JRB - 15)
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	29° (JRB - 17)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	34° (JRB - 17)
Discriminação Angular	24 (JRB - 15)
Discriminação Angular	29 (JRB - 17)
Polarização	H/V
Polarização	H/V
<i>Especificações elétricas para frequência de 3,5 GHz</i>	
Frequência	3,5 GHz
Modelo de Antena JRB25 – Ganho _{TX}	24 dBi
Modelo de Antena JRB19 – Ganho _{RX}	25 dBi
VSWR _{TX}	1,5
VSWR _{RX}	1,3
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	30° (JRB - 25)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	33° (JRB - 25)
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	30° (JRB - 19)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	35° (JRB - 19)
Discriminação Angular	31 (JRB - 25)
Discriminação Angular	42 (JRB - 19)
Polarização	H/V
Polarização	H/V
<i>Especificações elétricas para frequência de 5 GHz</i>	
Frequência	5 GHz
Modelo de Antena JC219 – Ganho _{TX}	28 dBi
Modelo de Antena JC221 – Ganho _{RX}	29 dBi
VSWR _{TX}	1,09
VSWR _{RX}	1,06
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	30.2° (JC - 219)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	31.5° (JC - 219)
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	20.8° (JC - 221)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	32.5° (JC - 221)
Discriminação Angular	33 (JC - 219)
Discriminação Angular	35 (JC - 221)
Polarização	H/V

FONTE: A autora (2019).

TABELA 12 – ANTENAS UTILIZADAS NAS FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz, 8,5 GHz E 11 GHz.

<i>Especificações elétricas para frequência de 5,8 GHz</i>	
Frequência	5,8 GHz
Modelo de Antena JCD219 – Ganho _{TX}	25 dBi
Modelo de Antena JCD234 – Ganho _{RX}	26 dBi
VSWR _{TX}	1,25
VSWR _{RX}	1,30
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	28° (JCD - 219)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	26° (JCD - 219)
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	30° (JCD - 234)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	32° (JCD - 234)
Discriminação Angular	31 (JCD - 219)
Discriminação Angular	32 (JCD - 234)
Polarização	H/V
Polarização	H/V
<i>Especificações elétricas para frequência de 8,5 GHz</i>	
Frequência	8,5 GHz
Modelo de Antena JR75 – Ganho _{TX}	29,5 dBi
Modelo de Antena JR72 – Ganho _{RX}	30,8 dBi
VSWR _{TX}	1,3
VSWR _{RX}	1,7
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	30° (JR - 75)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	32° (JR - 75)
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	29° (JR - 72)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	34° (JR - 72)
Discriminação Angular	33 (JR - 75)
Discriminação Angular	43 (JR - 72)
Polarização	H/V
Polarização	H/V
<i>Especificações elétricas para frequência de 11 GHz</i>	
Frequência	11 GHz
Modelo de Antena JL57 – Ganho _{TX}	36,6 dBi
Modelo de Antena JL55 – Ganho _{RX}	37,2 dBi
VSWR _{TX}	1,3
VSWR _{RX}	1,4
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	29° (JL - 57)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	28° (JL - 57)
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	31° (JL - 55)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	33° (JL - 55)
Discriminação Angular	30 (JL - 57)
Discriminação Angular	35 (JL - 55)
Polarização	H/V

FONTE: A autora (2019).

TABELA 13 - ANTENAS UTILIZADAS NAS FREQUÊNCIA DE 18 GHz E 23 GHz.

<i>Especificações elétricas para frequência de 18 GHz</i>	
Frequência	18 GHz
Modelo de Antena JLC53 – Ganho _{TX}	41,4 dBi
Modelo de Antena JLC59 – Ganho _{RX}	41,9 dBi
VSWR _{TX}	1,2
VSWR _{RX}	1,35
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	29° (JLC - 53)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	34° (JLC - 53)
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	27° (JLC - 59)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	27,9° (JLC - 59)
Discriminação Angular	32 (JLC - 53)
Discriminação Angular	35 (JLC - 59)
Polarização	H/V
<i>Especificações elétricas para frequência de 23 GHz</i>	
Frequência	23 GHz
Modelo de Antena JC256 – Ganho _{TX}	43 dBi
Modelo de Antena JC591 – Ganho _{RX}	43,6 dBi
VSWR _{TX}	1,1
VSWR _{RX}	1,22
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	27° (JC - 256)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	28° (JC - 256)
Rej. De Polarização Cruzada para 0°	30° (JC - 591)
Rej. De Polarização Cruzada para 120°	31° (JC - 591)
Discriminação Angular	30 (JC - 256)
Discriminação Angular	32 (JC - 591)
Polarização	H/V

FONTE: A autora (2019).

7) A justificativa para a escolha dos cabos, que irá se utilizar no projeto, também é de grande importância, pois o cabo pode ser responsável por algumas das possíveis perdas, que poderão ocorrer no enlace (GOMES, 2013). O cálculo da perda no cabo pode ser obtido pela equações (32), (33) e (34).

$$A_c = \frac{1,41 \times 10^3 \left(\frac{k}{2a} + \frac{k_a}{2b} \right) \sqrt{f+100} p f \sqrt{\epsilon_r}}{z_0} [dB] \quad (32)$$

$$z_0 = \frac{138,16}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{b k_a}{a k} \quad (33)$$

$$A_c \text{ metros} = \left(\frac{A_c \text{ altura de torre}}{100} \right) \quad (34)$$

Onde, a representa o raio do condutor Interno em [mm]; b é o raio do condutor externo em [mm]; k é o fator de correção para encordoamento do condutor interno; k_a representa o fator de correção para tipo de construção do condutor; f é a frequência de operação em [GHz]; p representa a tangente de perdas; z_0 é a impedância do cabo dado em [Ω] e ϵ_r representa a constante dielétrica [F/m].

A TABELA 14 sumariza de modo não exaustivo os tipos mais usuais de cabos para as oito frequências aqui analisadas:

TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS DOS CABOS.

FREQUÊNCIA	MODELO DE CABO	CABO CONDUTOR INTERNO [mm]	CABO CONDUTOR EXTERNO [mm]	CONSTANTE DIELETRICA [εr]	IMPEDÂNCIA Z_0	TANGENTE DE PERDAS
2,4 GHz	HF 3/5"	7,3	15,1	1,00	50	0,0001
	HF 1 4/5"	6,6	13,6	1,34	50	0,0001
	CF 1 5/8"	6,5	10,2	1,89	50	0,0002
3,5 GHz	MODELO DE CABO	CABO CONDUTOR INTERNO [mm]	CABO CONDUTOR EXTERNO [mm]	CONSTANTE DIELETRICA [εr]	IMPEDÂNCIA Z_0	TANGENTE DE PERDAS
	HF 7/8"	8,3	20,1	1,00	50	0,0001
	HF 1 5/8"	7,8	12,2	1,55	50	0,0001
5 GHz	CF 1 5/8"	7,5	8,3	2,30	50	0,0002
	MODELO DE CABO	CABO CONDUTOR INTERNO [mm]	CABO CONDUTOR EXTERNO [mm]	CONSTANTE DIELETRICA [εr]	IMPEDÂNCIA Z_0	TANGENTE DE PERDAS
	HF 5/8"	8,5	19,3	1,00	50	0,0001
5,8 GHz	HF 1 3/8"	7,4	14,5	1,65	50	0,0002
	CF 1 6/8"	7,2	8,1	2,35	50	0,0002
	MODELO DE CABO	CABO CONDUTOR INTERNO [mm]	CABO CONDUTOR EXTERNO [mm]	CONSTANTE DIELETRICA [εr]	IMPEDÂNCIA Z_0	TANGENTE DE PERDAS
8,5 GHz	HFF 6/7"	7,5	17,3	1,00	50	0,0001
	HF 1 5/7"	6,9	14,8	1,68	50	0,0002
	CF 1 3/7"	6,7	11,3	2,15	50	0,0002
11 GHz	MODELO DE CABO	CABO CONDUTOR INTERNO [mm]	CABO CONDUTOR EXTERNO [mm]	CONSTANTE DIELETRICA [εr]	IMPEDÂNCIA Z_0	TANGENTE DE PERDAS
	HF 4/8"	8,2	20,3	1,00	50	0,0002
	HF 1 2/8"	7,9	12,5	1,45	50	0,0002
18 GHz	CF 1 4/8"	6,9	8,4	2,37	50	0,0002
	MODELO DE CABO	CABO CONDUTOR INTERNO [mm]	CABO CONDUTOR EXTERNO [mm]	CONSTANTE DIELETRICA [εr]	IMPEDÂNCIA Z_0	TANGENTE DE PERDAS
	HHF 3/8"	8,5	22,3	1,00	50	0,0002
23 GHz	HF 1 2/5"	8,9	18,5	1,66	50	0,0002
	CF 1 4/5"	9,1	15,4	2,19	50	0,0002
	MODELO DE CABO	CABO CONDUTOR INTERNO [mm]	CABO CONDUTOR EXTERNO [mm]	CONSTANTE DIELETRICA [εr]	IMPEDÂNCIA Z_0	TANGENTE DE PERDAS
	HF 5/8"	8,7	23,5	1,00	50	0,0002
	HF 1 7/8"	8,8	18,6	1,72	50	0,0002
	CE 1 2/8"	9,2	14,2	2,55	50	0,0002
	MODELO DE CABO	CABO CONDUTOR INTERNO [mm]	CABO CONDUTOR EXTERNO [mm]	CONSTANTE DIELETRICA [εr]	IMPEDÂNCIA Z_0	TANGENTE DE PERDAS
	HF 5/8"	9,1	25,3	1,00	50	0,0002
	HF 1 7/8"	9,2	20,5	1,76	50	0,0002
	CF 1 5/8"	9,6	15,4	2,59	50	0,0002

FONTE: Adaptado de Engineering & Energy Resource (2019).

8) A perda devido ao conector representa algumas das possíveis perdas que poderão ocorrer no trajeto do sinal pelo guia de onda como ilustra a TABELA 15. Vale ressaltar que os conectores adotados foram baseados em consultas por pesquisa de internet e catalogo de fabricantes respectivo a cada frequência de estudo.

TABELA 15 – TIPOS DE CONECTORES.

TIPO DE CONECTOR	QUANTIDADE	ATENUAÇÃO POR CONECTOR	FAIXA DE FREQUÊNCIA
RGE - M	2	0,1 a 0,3 [dB]	1 GHz a 4 GHz
RGE - P	2	0,5 a 0,9 [dB]	5 GHz a 8,5 GHz
RGE - NT	2	1,0 [dB]	8,6 GHz a 12 GHz
RGE - O	2	1,5 a 1,7 [dB]	18 GHz a 23 GHz

FONTE: A autora (2018).

9) A atenuação por absorção ocorre devido aos gases (PG) presentes na atmosfera, pode ser calculado segundo a recomendação ITU-R P 676-3 (2019). Esta resolução prediz então que a atenuação por absorção seja dada pelas expressões (35), (36) e (37).

$$PG = (A_{as} + A_{au})d \text{ [dB]} \quad (35)$$

Onde, A_{as} representa a atenuação específica do ar seco/oxigênio em [dB/km]; A_{au} representa a atenuação específica do ar úmido/vapor d'água em [dB/km] e d representa a distância total do enlace [km].

$$A_{as} = \left(7,1910^{-3} + \frac{6,09}{f^{2+0,227}} + \frac{4,81}{(f-57)^2+1,50} \right) f^2 10^{-3} \text{ [dB]} \quad (36)$$

$$A_{au} = \left(0,050 + 0,0021p + \frac{3,6}{(f-22,2)^2+8,5} + \frac{10,6}{(f-183,3)^2+9} + \frac{8,9}{(f-325,4)^2+26,3} \right) pf^2 10^{-4} \quad (37)$$

Onde, p representa a densidade do vapor de água em [grama/m³] onde a norma recomenda usar $p=7,5$ g/m³.

10) A perda devido à chuva (PC) segue o a Recomendação ITU-R P. 838-3 (2005) e pode ser obtida pelas equações (38), (39) e (40);

$$PC = \gamma_r d_{ef} \text{ [dB]} \quad (38)$$

$$d_{ef} = (dr) \quad (39)$$

$$r = \frac{1}{0,477d^{0,633} R_{0,01}^{0,073} a_f^{0,123} - 10,579(1-e^{-0,024 d})} \quad (40)$$

Onde, d é a distância total do *link* em [km]; $R_{0,01}$ representa a taxa de chuva excedida em 0,01% (média por ano); d_{ef} representa o segmento do enlace em que está havendo maior incidência de chuva; r é o comprimento efetivo do enlace em [km] e $A_{0,01}$ representa a atenuação estimada no percurso para uma porcentagem de tempo em [dB].

11) A área de assinatura (AAS) significa, simplesmente, a quantificação da robustez do equipamento de recepção relativo as distorções provocadas pelos desvanecimentos seletivos. A equação geral que define este parâmetro é padronizado pela ITU-R F.1093 (2006). Para este cálculo se utiliza as equações (41), (42) e (43).

$$AAS = \frac{(S_m + S_{nm})}{2} [dB] \quad (41)$$

$$S_m = \frac{(\lambda_m B_s 10^{-3})}{\tau_r} \quad (42)$$

$$S_{nm} = \frac{(\lambda_{nm} B_s 10^{-3})}{\tau_r} \quad (43)$$

Onde, S_m é a área de assinatura para fase mínima; S_{nm} representa a área de assinatura para fase não mínima; λ_m representa a profundidade média para fase mínima; B_s representa a largura de faixa das áreas de assinatura em [MHz] e τ_r representa o atraso de referência padrão para equipamentos de 6,3 (valor determinado a partir de estudos de um grande número de eventos de desvanecimento) em [ns].

12) A margem de desvanecimento dispersivo (MDD) também é mais um dos fatores indicativos do estado do sistema, (HAL,1996). Esse Parâmetro transforma os erros por distorções provocadas por múltiplos percursos (ruído) para fins de determinação da inoperância. Para este cálculo, utiliza-se as expressões (44) e (45).

$$MDD = 17,6 - 10 \ln \frac{S_w}{158,4} [dB] \quad (44)$$

$$S_w = e^{\frac{-(S_m + S_{nm})}{3,8}} B_s \quad (45)$$

Onde, S_w representa a curva da área de assinatura dispersiva.

5.4 PARÂMETROS DE POTÊNCIA

Uma vez que o enlace tenha sido dimensionado, na sequência passa-se a verificação dos níveis de sinal recebido que vão atuar diretamente no cálculo final de confiabilidade do sistema.

13) O limiar de recepção ou potência limiar (LR) representa o valor limite do nível de sinal admissível na entrada do receptor. No Capítulo 2, nas FIGURAS 5 a 11 foram apresentados os respectivos limiares de recepção de cada frequência.

14) A potência isotrópica efetivamente irradiada (e.i.r.p) representa uma verificação realizada para saber qual a real potência que a antena está transmitindo (cálculo realizado para qualquer tipo de antena). Para este cálculo se utiliza a expressão (46).

$$\text{e.i.r.p} = (P_t + G_t) - A_c \quad [\text{dBm}] \quad (46)$$

Onde, P_t é a potência transmitida em [dBm]; G_t representa o ganho de transmissão em [dBi] e A_c representa a perda devido ao cabo na transmissão em [dB].

15) O nível de recepção nominal ou nível de potência recebida (P_R) representa o nível de sinal na entrada do receptor, não considerando possíveis desvanecimentos (possíveis multipercursos) e a presença do ruído, (GOMES, 2003). A equação que permite este cálculo é dada pela equação (47):

$$P_R = P_t - A_T \quad [\text{dBm}] \quad (47)$$

Onde, P_t representa a potência transmitida em [dBm] e A_T é a atenuação total líquida do enlace [dB] (representa a soma de todas as perdas sofridas dentro do *link* subtraindo os ganhos das antenas).

16) A margem de desvanecimento (MD) representa uma margem de segurança para o sistema. Ela correlaciona à potência recebida com a potência limiar do sistema, ou seja, quanto mais próximos os níveis estiverem um do outro, maior será a degradação do sinal e é dada pela equação (48).

$$MD = P_R - LR \text{ [dB]} \quad (48)$$

Onde, P_R é a potência recebida em [dBm] e LR representa a potência limiar do sistema em [dBm].

17) A margem de desvanecimento por interferência (MDI) representa uma possível degradação no enlace devido a interferência que outros sistemas próximos a ele. Para este cálculo se utiliza a seguinte equação (49):

$$MDI = MD - 1 \text{ [dB]} \quad (49)$$

Observação: Por se tratar de um parâmetro indicativo de possíveis perdas dentro do enlace, foi adotado um cenário otimista que é representado pelo valor de 1 dB.

5.5 PARÂMETROS DE RUÍDO

O ruído representa um sinal que pode vir a degradar um sistema. E podem ser gerados por uma série de variedades de fontes, que podem ser naturais ou artificiais, (KITAO, 2015). Um sistema de transmissão deve ter um nível de ruído o mais baixo possível para que o desempenho do enlace não fique degradado. Os principais tipos de ruído são:

- Ruído externo (é considerado como uma propriedade do canal);
- Ruído interno (originado no próprio equipamento constitutivo do sistema).

De modo sumarizado desprende-se que:

- Os tipos mais comuns de ruído externo são: os ruídos com origem em outros equipamentos, o ruído atmosférico e o ruído espacial;
- Os tipos mais comuns de ruído interno são: o ruído térmico, o ruído *de eco* e o ruído interferente (mesma polarização e polarização cruzada).

18) O fator de ruído (FR), no receptor em [dB], é calculado, utilizando-se a expressão (50):

$$FR = 10 \log \left(1 + \frac{T}{290} \right) [dB] \quad (50)$$

Onde, T representa a temperatura de ruído [°K].

Pode-se sumarizar, através da TABELA 16, os valores fornecidos pela relação FR e T como segue:

TABELA 16 - RELAÇÃO ENTRE A FATOR DE RUÍDO E A TEMPERATURA

Fator de Ruído	Temperatura T °K
2 dB	75
3 dB	290
4 dB	627

FONTE: A autora (2019).

Observação - Embasado em fontes bibliográficas, foi adotado para este trabalho o valor de 3 dB para figura de ruído.

19) A relação sinal/ruído (RSR) expressa em [dB], representa uma relação logarítmica entre a potência recebida nos terminais do receptor com uma potência contaminada de ruído de natureza térmica. Logo a expressão que caracteriza esta relação em [dB] dada pela equação (51):

$$RSR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_n} \right) \quad (51)$$

Onde, P_n representa a potência do ruído em [dB].

20) O nível de ruído térmico (TR) representa o ruído gerado pela agitação térmica de cargas no equipamento de transmissão e é dado pela expressão (52):

$$TR = -174 + 10 \log LB + FR [dBm] \quad (52)$$

Onde, TR representa o ruído térmico em 100% do tempo em [dBm] e LB é a largura de banda.

21) O ganho do sistema ou o valor do sistema (VS) é regido pela Recomendação ITU-R PN. 837-1 e representa o valor ideal da relação sinal-ruído na saída do transmissor que seria obtida no caso de uma ligação transmissor-receptor sem perdas. Supondo

que o transmissor esteja isento de ruídos interferentes considerando apenas a figura de ruído. Logo a expressão que caracteriza esta relação em [dB] será dada pela equação (53):

$$VS = P_t - FR - 10\log \frac{KT}{10^{-3}} + 20\log \frac{LB}{f_0} + 139 \text{ [dB]} \quad (53)$$

Onde, FR representa a figura de ruído do receptor em [dB]; k representa a constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ [J/°K]; T é a temperatura de ruído em [°K]; LB representa a largura de banda do canal em [MHz] e f_0 é a frequência central do canal em [MHz].

22) A contribuição do ruído térmico para 50% do tempo ($TR50\%$) é necessária para prever o nível de ruído quando ele opera em apenas 50% do tempo. Logo a expressão que caracteriza esta relação em [dB] é dada pela equação (54).

$$TR50\% = TR - VS \text{ [dB]} \quad (54)$$

Onde, TR é o valor do ruído térmico para 100% do tempo e o VS representa o ganho do sistema.

23) A contribuição do ruído térmico para 80% do tempo ($TR80\%$) é necessária para prever o nível de ruído quando ele opera em 80% do tempo. Este valor pode ser estimado a partir do resultado da contribuição do ruído para 50% do tempo.

24) O ruído de eco (RE) representa um tipo de ruído interno do sistema que considera a influência da perda de retorno do sinal da antena bem como a velocidade de transito do sinal nos cabos e a *Voltage Standing Wave Ratio* - VSWR, (SALLES, 2010). O ruído de eco pode ser determinado pelas expressões (55), (56), (57), (58), (59), (60) e (61).

$$RE = 18,6 + PR_a + PR_b + 2A_c + X \text{ [dB]} \quad (55)$$

Onde, PR_a Representa a perda de retorno da antena transmissora em [dB]; PR_b é a perda de retorno da antena receptora em [dB] e A_c é a atenuação no cabo por metro de comprimento [m].

$$PR = 20 \log \frac{VSWR+1}{VSWR-1} \quad (56)$$

$$X = FC_{bb} + m + \Delta\emptyset \quad (57)$$

$$FC_{bb} = -15 \log N \quad (58)$$

$$m = \frac{\Delta f_{ef} 10^{\frac{FC_{bb}}{20}}}{f} \quad (59)$$

$$\tau = \frac{2A_c}{v_{tc}} \quad (60)$$

$$\Delta\emptyset = 10 \log(f + \tau) \quad (61)$$

Onde, N representa o número de canais considerados; X é a atenuação por indução dentro do canal considerado em [dB]; Δf_{ef} representa a largura de banda do canal em [MHz]; f é a frequência de operação do enlace [GHz]; τ representa a velocidade de transito do sinal no cabo por [m/s] e c representa a velocidade da luz por [m/s].

25) O ruído interferente (RI) é um tipo de ruído interno produzido pelo ganho das antenas, pela sua discriminação angular, pela atenuação nos conectores em função da potência transmitida e da atenuação. Existem dois modos de produção do ruído interferente: o ruído interferente produzido por polarização paralela e o ruído interferente por polarização cruzada.

- O ruído interferente por polarização paralela (RIPP) pode ser calculado pela expressões (62) e (63).

$$\frac{S}{NI_{\emptyset}} = 20 \text{ dB} + P_r - Y - RI_{\emptyset} \text{ [dB]} \quad (62)$$

$$RIPP_{\emptyset} = P_t + G_A + G_B - A_T - P_{alim\ a} - P_{alim\ b} - D_{\emptyset} \quad (63)$$

Onde, A_T representa a atenuação líquida em [dB]; $P_{alim\ a}$ representa a perda nos alimentadores da estação transmissora A em [dB]; $P_{alim\ b}$ representa a perda nos alimentadores da estação transmissora B [dB] e D_{\emptyset} é a discriminação angular da antena em [dB].

- O ruído interferente por polarização cruzada (RIPC) pode ser calculado pelas equações (64) e (65).

$$\frac{S}{NI_{PC}} = 20 \text{ dB} + P_r - Y - RI_{PC} \text{ [dB]} \quad (64)$$

$$RIPC_{\emptyset} = RI_{\emptyset} - R_{PC} \quad (65)$$

Onde, R_{pc} representa a polarização cruzada em [dB].

5.6 PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE

A determinação da confiabilidade de um *link* impacta na escolha dos equipamentos mais adequados para atender às necessidades do sistema, (ONGARATTO, 2009).

26) A inoperância do sistema (k) analisa o desempenho de sistemas de transmissão, baseia-se na estimativa da probabilidade de inoperância. Diversos métodos foram desenvolvidos para a determinação da inoperância, quando o enlace fica submetido às condições anômalas de propagação, porém o que foi utilizado neste trabalho foi o recomendado pela ITU-R P.530-14 que é determinado pela expressão (66):

$$k = 10^{-4,4-0,0027 \, dN_1} \quad [\%] \quad (66)$$

Onde, dN_1 representa o valor estatístico do gradiente de refratividade, que pode ser obtidos através da Recomendação ITU-R P.453-9.

27) A probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento não seletivo (*PIDNS*), corresponde pequenas variações na intensidade do sinal, o qual é causado pelos efeitos atmosféricos, tais como a difração e atenuação devido à chuva. Nos sistemas de transmissão, esse tipo de comportamento é conhecido como desvanecimento lento. Logo, a expressão que caracteriza esta relação em [dB] será dado pelas equações (67) e (68).

$$PIDNS = P_0 \, 10^{\frac{-MD}{10}} \quad [\%] \quad (67)$$

$$P_0 = \frac{k}{100} \quad (68)$$

Onde, MD representa a margem de desvanecimento em [dB] (descrita na equação 48) e k representa a inoperância do sistema em [%] (descrita na equação 66).

28) A probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento seletivo (PIDS) é um tipo de desvanecimento causado pelos múltiplos percursos que o sinal sofre durante a sua trajetória, cuja ocorrência está associada com as condições geoclimáticas (reflexões, refrações entre outros) da região. Logo, a expressão que caracteriza esta relação em [dB] é dada pela equações (69), (70) e (71).

$$PIDS = 4,3 \eta AAS \tau_m^2 [\%] \quad (69)$$

$$\eta = 1 - \exp(-0,2 P_0^{0,75}) \quad (70)$$

$$\tau_M = 0,7 \left(\frac{d}{50}\right)^{1,3} \quad (71)$$

Onde, η representa o fator de ocorrência de propagação; τ_M representa o atraso médio entre dois percursos em [ns]; d é a distância do enlace em [km]; AAS representa a área de assinatura e k representa a inoperância do sistema em [%].

29) A probabilidade do período de inoperância total em minutos por ano (PITMA) representa a soma das probabilidades de inoperância em virtude do desvanecimento não seletivo e em função também do desvanecimento seletivo para o pior mês do ano (considerando para o período de referência ou observação, $T_0 = 1$ mês = 43.200 minutos). Logo, a expressão que caracteriza esta relação em [dB] é dada pelas expressões (72) e (73).

$$PITMA = P_{tot} (43.200) \text{ min/Ano} \quad (72)$$

$$P_{tot} = (P_{ns} + P_s) [\%] \quad (73)$$

Onde, P_{tot} representa a soma total das probabilidades de Inoperância em razão do desvanecimento não seletivo e seletivo.

30) A porcentagem de tempo em operação se traduz como o período de tempo em que o sistema opera com níveis iguais ou abaixo de um valor limite, que pode ser calculado pela expressão (74).

$$PTO(\%) = (100 - PITMA) \quad (74)$$

Onde, *PITMA* representa a Probabilidade do período de Inoperância total em [minutos/Ano].

31) A confiabilidade (CONF) de um *link*, pode ser calculada pelas equações (75) e (76), uma vez verificado se o enlace concebido atende aos critérios de inoperância.

$$Conf = 100 - (PIDNS + PIDS + I) \quad [\%] \quad (75)$$

$$I = 1 - \frac{1}{2} 10^{\left(-\frac{M}{100}\right)} \quad [\%] \quad (76)$$

Onde:

I – Representa a probabilidade de perdas total do sistema;

M – Representa o somatório dos ganhos das antenas de transmissão e recepção com o ruído total e com atenuação total do *link*.

5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram discutidos os principais aspectos relativos à concepção de um rádio enlace, suas características e peculiaridades. Os objetivos de concepção foram discutidos em função da estrutura física de um enlace. Assim, perdas provocadas devido às características do equipamento e do ambiente de propagação, em relação aos níveis de recepção, bem como aos níveis de ruídos preexistentes no sistema, visando a assegurar dessa forma a determinação da confiabilidade.

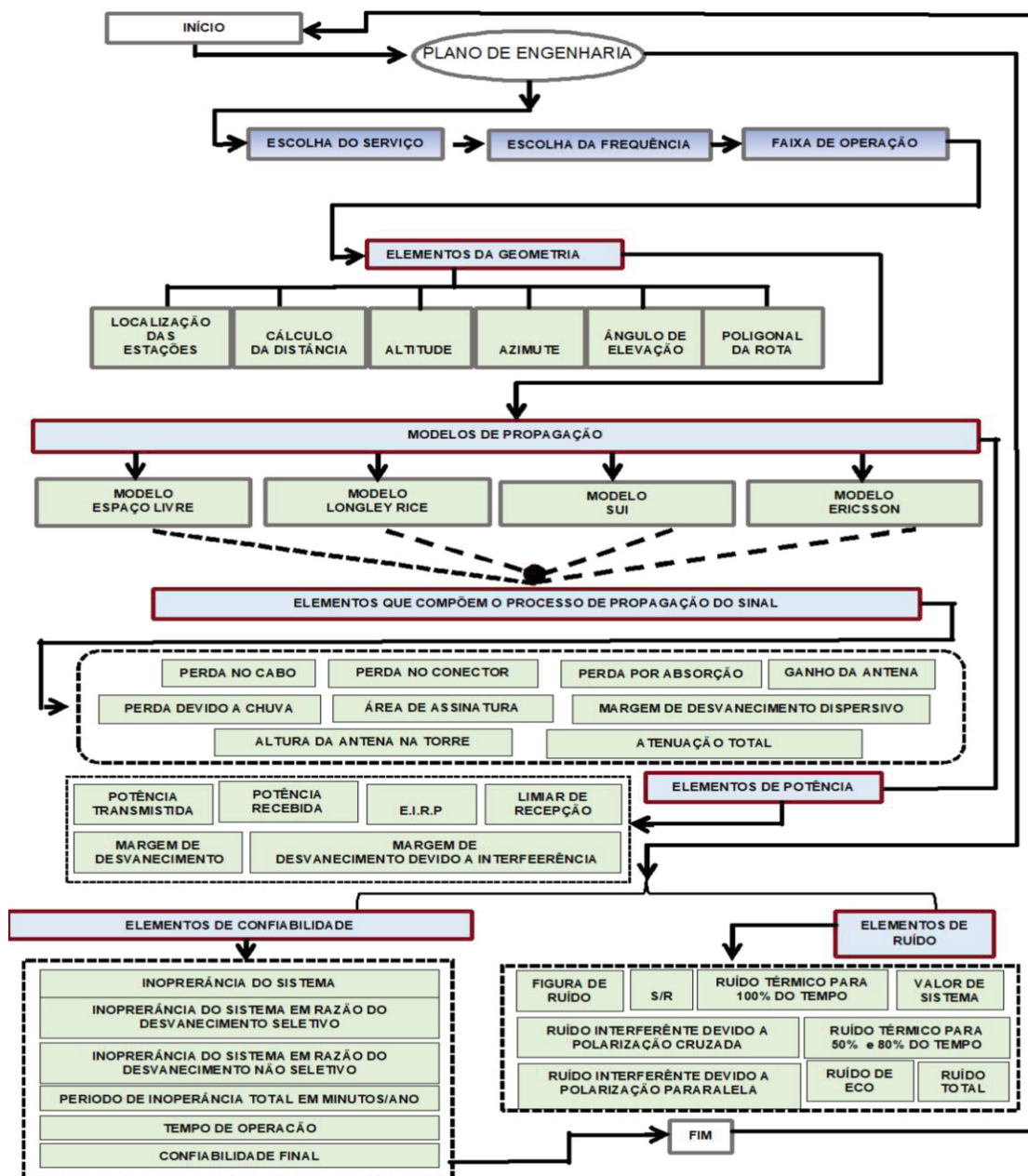
Os resultados desses procedimentos descritos nesse capítulo serão apresentados no Capítulo 7.

CAPÍTULO 6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 SISTEMA DE TRANSMISSÃO (PARTE 1)

Primeiramente serão apresentados através de um fluxograma uma síntese de todos os parâmetros aqui abordados neste trabalho como mostra a FIGURA 15.

FIGURA 15 – FLUXOGRAMA QUE REPRESENTA A PRIMEIRA FASE DO SISTEMA.



FONTE: A Autora (2018).

A síntese de funcionamento da metodologia proposta neste trabalho, segue a ideia apresentada no Fluxograma e o seu detalhamento está descrito na TABELA 17:

TABELA 17 – DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA

Critérios		Normatizações
a) FASE INICIAL – PLANO DE ENGENHARIA		
Passo 1	Definição das Características desejadas	-----
Passo 2	Descrição do Sistema	Formulário da ANATEL-165
Passo 3	Definição do Tipo de Serviço	-----
Passo 4	Escolha da Frequência	Legislação vigente aplicada
Passo 5	Escolha da Faixa de Operação	Canalização específica para cada frequência
b) DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS DA GEOMETRIA		
Passo 6	Localização das Estações	-----
Passo 7	Cálculo da Distância Ortodrômica	-----
Passo 8	Altitude	-----
Passo 9	Cálculo do Azimute	ITU-R 530 – 09
Passo 10	Cálculo do Ângulo de Elevação	ITU-R 530 – 09
Passo 11	Definição do poligonal da rota	Formulário da ANATEL – 104
c) ESCOLHA DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO		
Passo 12	Modelo do Espaço Livre	-----
Passo 13	Modelo <i>Longley Rice</i>	-----
Passo 14	Modelo <i>Sui</i>	-----
Passo 15	Modelo <i>Ericsson</i>	-----
d) DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS DE PERDA		
Passo 16	Perda no Cabo	ITU-R 341-5
Passo 17	Perda no Conector	ITU-R 676-3
Passo 18	Perda por absorção de gases atmosféricos	ITU-R P. 676-3
Passo 19	Tipo de antena – Ganho da antena	Recomendação ETSI TR 102 243-1
Passo 20	Altura da antena na torre	-----
Passo 21	Perda devido à chuva	ITU-R P.837-6
Passo 22	Área de assinatura	ITU-R F.1093
Passo 23	Margem de desvanecimento dispersivo	Recomendação ITU-R P.1093-1
Passo 24	Atenuação total do <i>link</i>	-----
e) DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS DE POTÊNCIA		
Passo 25	Potência transmitida	Específica para cada frequência
Passo 26	Potência recebida	-----
Passo 27	E.I.R.P	Específica para cada frequência
Passo 28	Limiar de recepção	Específico para cada equipamento
Passo 29	Margem de desvanecimento	-----
Passo 30	Margem de desvanecimento devido a interferência	-----
f) DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS DE RUÍDO		
Passo 31	Figura de ruído	ETSI EM 301 753 V1.1.1
Passo 32	Relação sinal/ruído	ETSI TR 101 854
Passo 33	Ruído térmico para 100% do tempo	ITU-R P.372-10
Passo 34	Ruído térmico para 50% e 80% do tempo	-----
Passo 35	Valor de sistema	ITU-R PN 837-1
Passo 36	Ruído interferente (polarização cruzada)	Recomendação ITU-R P.530-10
Passo 37	Ruído interferente (polarização paralela)	Recomendação ITU-R P.530-10
Passo 38	Ruído de eco	-----
Passo 39	Ruído total do <i>link</i>	-----
g) DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS DE CONFIABILIDADE		
Passo 40	Inoperância do Sistema	ITU – R P.453-9
Passo 41	Inoperância em razão do desvanecimento seletivo	ITU-R F. 1093-1
Passo 42	Inoperância em razão do desvanecimento não seletivo	ITU-R F. 1093-1
Passo 43	Período de inoperância total em min/Ano	ITU-R P. 530-17
Passo 44	Tempo de operação	ITU-R P. 530-17
Passo 45	Confiabilidade	ITU-R F. 1093-1

FONTE: A autora (2020).

6.2 METODOLOGIA DETALHADA

A metodologia desenvolvida tem por objetivo compilar e sistematizar conceitos teóricos fundamentados na literatura e apresentá-los de maneira inovadora, de forma a ser a base do *software* de predição nomeado de SINMCEL (*Software* Inteligente de Nivelamento que Mapeia e Controla Dados entre *Links*). A ferramenta SINMCEL foi desenvolvida utilizando uma base de dados da região da cidade de Curitiba, considerando a aplicação para sistemas de transmissão do tipo ponto – multiponto. Essa ferramenta apresenta as seguintes características:

- Cálculo e apresentação dos principais parâmetros de operação de forma individualizada referente a cada um dos *links* que compõem o Sistema de Transmissão;
- Canalização e regulamentações legais específicas para cada frequência de operação, submetendo os dados de entrada a uma validação criteriosa;
- Sinalização de avisos de alerta para o usuário sobre possíveis erros de preenchimento ou de informações incompatíveis com os limites estabelecidos do sistema (exemplo: utilizar uma potência acima do limite aceitável para uma determinada frequência, o sistema sinaliza um aviso, alertando-o da falha e ainda indica a resolução que retrata o assunto);
- Realização de simultâneas simulações de até dois modelos de propagação, mostrando, via interface visual e interativa, os resultados comparativos referentes a cada um deles;
- Oferecimento de duas formas de análise dos resultados obtidos, quer seja pelo formato de barras em movimento quer seja pelo formato de linhas e setas fixas;
- Eficiência de visualização que se traduz pela duplicidade das formas de análise;
- Ampla possibilidade de alterações pontuais;
- Visualização melhorada e compreensão mais clara dos resultados obtidos;
- Permissão ao usuário o acesso de forma automática do significado de cada sigla que corresponde a cada resultado obtido no enlace;
- Combinação alinhada dos parâmetros do sistema com as recomendações técnicas e normas vigentes, com o propósito de oferecer ao usuário a possibilidade de usar estes dados tecnicamente confiável e legalmente seguro;

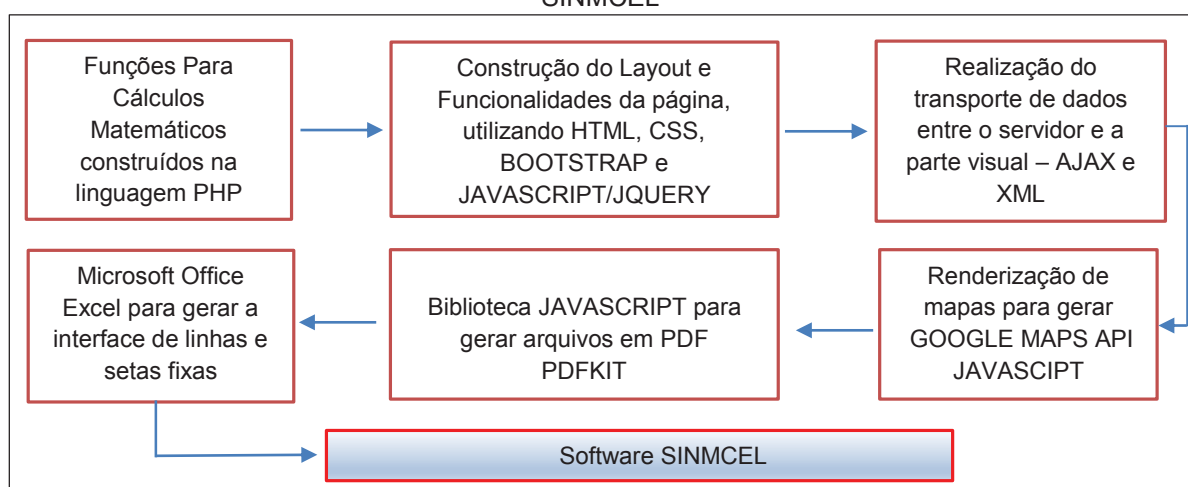
- Relatório, gerado em PDF, dos resultados obtidos tanto para um único *link* isoladamente quanto para o cenário de até 8 (oito) *links*, simulados dentro desse mesmo sistema. A importância desse PDF, reside no fato de que, a partir dele, é possível verificar o desempenho do *link*, analisando os níveis operacionais de cada um e a forma como interferem, de maneira individualizada, na operação do sistema.

6.2.1 Materiais e Métodos Utilizados

Todas as simulações apresentadas nesta tese foram realizadas em um computador com processador Intel® Core™ i5-8265U CPU @ 1.60 GHz, com 8,00 GB de memória RAM e sistema operacional Windows de 64 bits.

Para a realização do presente trabalho, foram necessários os seguintes recursos de programação como mostra a FIGURA 16.

FIGURA 16 – RECURSOS UTILIZADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA SINMCEL



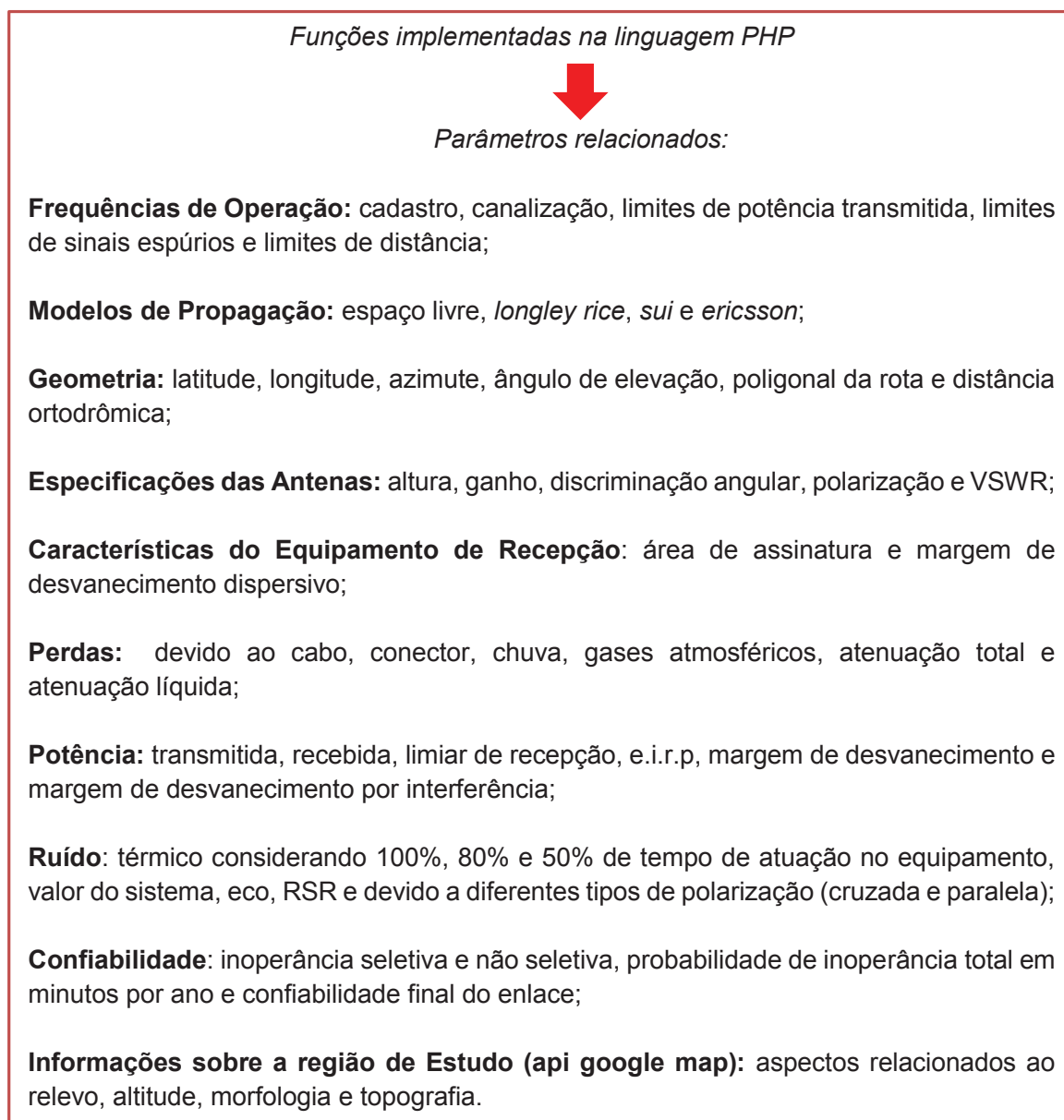
FONTE: A autora (2020).

Na FIGURA 16, são apresentados os recursos utilizados no desenvolvimento da ferramenta computacional SINMCEL. O detalhamento do processo metodológico foi realizado em sete etapas como apresentado a seguir.

- Primeira Etapa – Após pesquisa e análise dos principais parâmetros de um *link* serem selecionados (parâmetros relacionados a legislação, modelos de propagação, perdas, potência, ruído e confiabilidade), escolheu-se uma linguagem

de programação que seria mais adequada para o tipo de interface que se desejava. Dessa forma, foi utilizada a linguagem de programação PHP para implementar todas as funções necessárias à realização dos cálculos como mostra a FIGURA 17;

FIGURA 17 – SÍNTESE DAS FUNÇÕES IMPLEMENTADAS NA LINGUAGEM EM PHP.



FONTE: A autora (2019)

- Segunda Etapa – Nesta fase foi necessário criar uma página web, para tal, foram utilizados um conjunto de tecnologias Web HTML (*HyperText Markup Language*), CSS (*Cascading Style Sheets*) e *BOOTSTRAP* em conjunto. Todas as páginas do sistema foram geradas a partir da junção destas três tecnologias. As FIGURAS 18, 19 e 20 mostram o layout da página criada.

FIGURA 18 – A LANDING PAGE DO SOFTWARE.



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 19 – LAYOUT DA FERRAMENTA EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE ENTRADA.

The figure displays two screenshots of the SINMCEL software interface, showing the input parameters for station names and coordinates/altitudes.

Top Screenshot: Nomes das Estações A e B

- Left Sidebar (Menu):**
 - 01 Nomes das Estações (Selected)
 - 02 Coordenadas e Alturas
 - 03 Frequências
 - 04 Ganho, Perda, Potência e Modelos
- Main Content Area:**
 - Header:** Nomes das Estações A e B
 - Instruction:** Digite Abaixo os Nomes das Estações A e B.
 - Form Fields:**
 - Nome Estação A: Estação A
 - Nome Estação B: Estação B
 - Action:** A green circular button with a right arrow (→) is located at the bottom right.

Bottom Screenshot: Coordenadas das Estações e Alturas das Antenas

- Left Sidebar (Menu):**
 - 01 Nomes das Estações
 - 02 Coordenadas e Alturas (Selected)
 - 03 Frequências
 - 04 Ganho, Perda, Potência e Modelos
- Main Content Area:**
 - Header:** Coordenadas das Estações e Alturas das Antenas
 - Section: Coordenadas Estação A (Graus)**
 - Latitude (24°00'00.00"S): Latitude
 - Longitude (47°00'00.00"O): Longitude
 - Section: Coordenadas Estação B (Graus)**
 - Latitude (24°00'00.00"S): Latitude
 - Longitude (47°00'00.00"O): Longitude
 - Section: Altura das Antenas (Metros)**
 - Altura da Antena A: Antena A
 - Altura da Antena B: Antena B
 - Action:** A green circular button with a right arrow (→) is located at the bottom right.

FONTE: A autora (2019).

FIGURA 20 – LAYOUT DA FERRAMENTA EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE ENTRADA RELACIONADOS A FREQUÊNCIA.

01 Nomes das Estações

02 Coordenadas e Alturas

03 Frequências

04 Ganho, Perda, Potência e Modelos

Frequência e Faixa de Frequência

Frequências Disponíveis de Acordo com as Resoluções da Anatel.

Frequência de Operação (GHz)

GHz

Faixa de Frequência. Entre 0 a 0 (MHz)

Faixa de Frequência Inicial

Faixa de Frequência Final

→

Ganho, Perda, Potência e Modelos

Ganho das Antenas (dBi)

Ganho Antena A (Padrão)

Ganho Antena B (Padrão)

Selecione o Tipo de Polarização

Tipo Polarização

Selecione as Perdas (dB)

Perda Devido ao Cabo (Padrão)

Perda no Conector (Padrão)

Selecione o Limiar de Recepção (dBm)

Limiar de Recepção (Padrão)

Selecione a Potência Transmitida (dBm)

Potência Transmitida (Padrão)

Selecione os Modelos

Modelo 1

Modelo 2

✓

FONTE: A autora (2019).

- Terceira Etapa – Neste ponto do trabalho, foi necessário utilizar também a linguagem de Programação JAVASCRIPT e a Biblioteca JQUERY com o intuito de dar as páginas web (construídas com HTML, CSS E BOOTSTRAP) caráter dinâmico. Permitindo ao sistema fazer as validações dos dados fornecidos pelos usuários. A FIGURA 21 mostra um exemplo de transição dinâmica do sistema.

FIGURA 21 – EXEMPLO DE TRANSIÇÃO DINÂMICA QUANDO O USUÁRIO ESQUECE DE PREENCHER UMA DAS ENTRADAS OBRIGATÓRIAS.

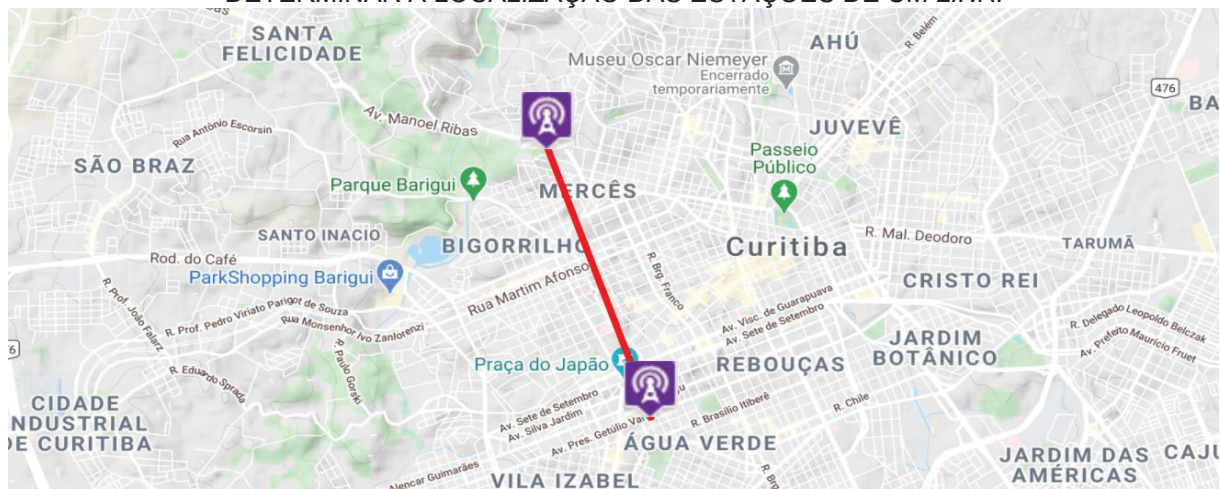
The screenshot shows a web application interface with a sidebar menu on the left containing four items: 01 Nomes das Estações, 02 Coordenadas e Alturas, 03 Frequências, and 04 Ganho, Perda, Potência e Modelos. The main content area displays a form for station data. A modal dialog box is open, displaying the message: "sinmcel.nuvenscorporation.com diz: Campo Altura Estação B Não Preenchido! Favor Preencher Todos os Campos." with an "OK" button. The form fields visible include: "Latitude (24°00'00.00\"S)" with value "25° 26' 25.43\" S", "Longitude (47°00'00.00\"O)" with value "49° 27' 82.34\" O", "Coordenadas Estação B (Graus)" with "Latitude (24°00'00.00\"S)" as "25° 27' 28.32\" S" and "Longitude (47°00'00.00\"O)" as "49° 15' 27.87\" O", and "Altura das Antenas (Metros)" with "Altura da Antena A" as "25" and "Altura da Antena B" as "Antena B". A green arrow button is at the bottom right of the form.

FONTE: A autora (2019).

O exemplo mostrado na FIGURA 21, apresenta justamente uma forma de validação do *software*, informando ao usuário que um dos campos anteriores não foi preenchido corretamente e faz-se necessário uma reparação dessa falha para dar prosseguimento no preenchimento dos dados obrigatórios.

- Quarta Etapa – As ferramentas AJAX e XML são utilizadas para o transporte de dados entre o servidor (dados retornados pelas funções em PHP) e a visualização na página web (*JavaScript*).
- Quinta Etapa – Nesta fase, foi implementada a API do Google, utilizando uma biblioteca em Javascript com a função de renderizar MAPAS; de acordo com as coordenadas das estações, altitude do terreno bem como outros parâmetros relacionados a topografia e morfologia da região, como pode ser observado no exemplo mostrado na FIGURA 22;

FIGURA 22 – IMPLEMENTAÇÃO DA API DA GOOGLE NA FERRAMENTA SINMCEL PARA DETERMINAR A LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE UM LINK.



FONTE: A autora (2019).

- Sexta Etapa – Na penúltima etapa, foi implementada uma biblioteca JAVASCRIPT, conhecida como ferramenta PDFKIT. Essa ferramenta tem a finalidade de gerar arquivos em PDF, utilizando os dados retornados pelo servidor e que são armazenadas no XML. A FIGURA 23 mostra parte de um relatório em PDF de uma simulação realizada para testes;

FIGURA 23 – IMPLEMENTAÇÃO DA FERRAMENTA PDKIT PARA GERAR RELATÓRIO EM PDF.

Potência Transmida: 33 dBm		
Resultado Referentes aos Modelos		
LongleyRice		Ericsson
Perda Devido o Modelo LongleyRice: 119.33 dB		Perda Devido o Modelo Ericsson: 107.37 dB
Perda Devido à Chuva: 0.323 dB		Perda Devido à Chuva: 0.323 dB
Perda Devido Gases Atmosféricos: 0.026 dB		Perda Devido Gases Atmosféricos: 0.026 dB
Área de Assinatura: 0.001105 dB		Área de Assinatura: 0.001105 dB
Margem de Desvanecimento Dispersivo: 22.20 dB		Margem de Desvanecimento Dispersivo: 22.20 dB
Atenuação Total do Link: 75.48 dB		Atenuação Total do Link: 63.52 dB
Potência Recebida: -42.485 dB		Potência Recebida: -30.521 dB
Margem de Desvanecimento: 46.51 dB		Margem de Desvanecimento: 58.47 dB
Margem de Desvanecimento por Interferência: 45.51 dB		Margem de Desvanecimento por Interferência: 57.47 dB
Nível de Ruído Térmico Para 100% do Tempo: -91 dB		Nível de Ruído Térmico Para 100% do Tempo: -91 dB
Nível de Ruído Térmico Para 50% do Tempo: 45.5 dB		Nível de Ruído Térmico Para 50% do Tempo: 45.5 dB
Nível de Ruído Térmico Para 80% do Tempo: 72.8 dB		Nível de Ruído Térmico Para 80% do Tempo: 72.8 dB
Relação Sinal/Ruído (Tipo I): 48.51 dB		Relação Sinal/Ruído (Tipo I): 60.47 dB
Ruído Interferente Devido a Polarização Cruzada: 0.75491 dB		Ruído Interferente Devido a Polarização Cruzada: 0.40162 dB
Ruído Interferente Devido a Polarização Paralela: 1.08179 dB		Ruído Interferente Devido a Polarização Paralela: 0.61182 dB
Ruído de Eco: 6.08715 dB		Ruído de Eco: 6.08715 dB
Nível de Ruído Total Para 100% do Tempo: 98.9 dB		Nível de Ruído Total Para 100% do Tempo: 98.1 dB
Nível de Ruído Total Para 50% do Tempo: 53.42 dB		Nível de Ruído Total Para 50% do Tempo: 52.60 dB
Nível de Ruído Total Para 80% do Tempo: 80.72 dB		Nível de Ruído Total Para 80% do Tempo: 79.90 dB
Relação Sinal/Ruído (Tipo II): 41.438 dB		Relação Sinal/Ruído (Tipo II): 52.579 dB

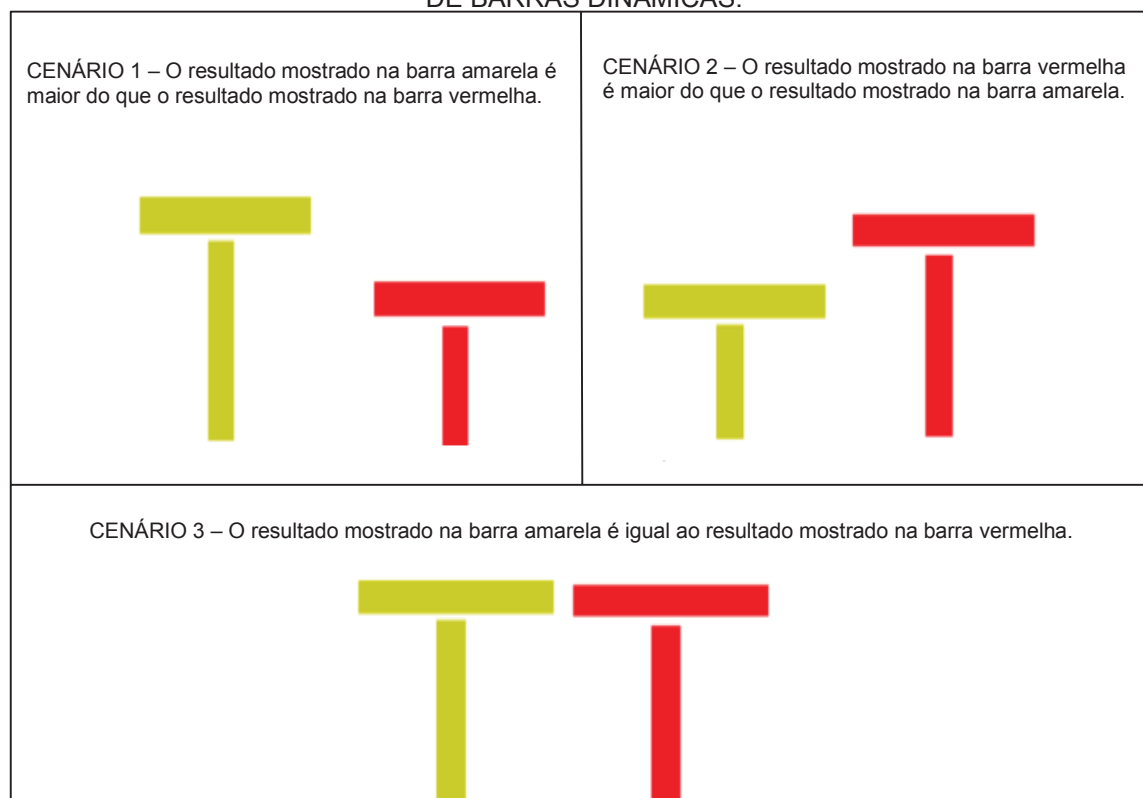
FONTE: A autora (2019).

- Sétima Etapa – Nesta última etapa do processo, foi utilizada a ferramenta computacional *Microsoft Office Excel* associada à linguagem de programação *JAVASCRIPT* para compor a interface gráfica.

Após a finalização de toda a implementação necessária para a construção do *software* SINMCEL, validou-se a técnica proposta neste trabalho, que é a interface visual gráfica, ou seja, o Diagrama de Nivelamento propriamente dito. Como salientado no início desse capítulo, o Diagrama de Nivelamento poderá ser analisado em dois formatos:

- a) Diagrama de Nivelamento em formato de barras que se movimentam como ilustra a FIGURA 24 a seguir.

FIGURA 24 – ESTRUTURA DO DIAGRAMA DE NIVELAMENTO NO FORMATO DE BARRAS DINÂMICAS.



FONTE: A autora (2019).

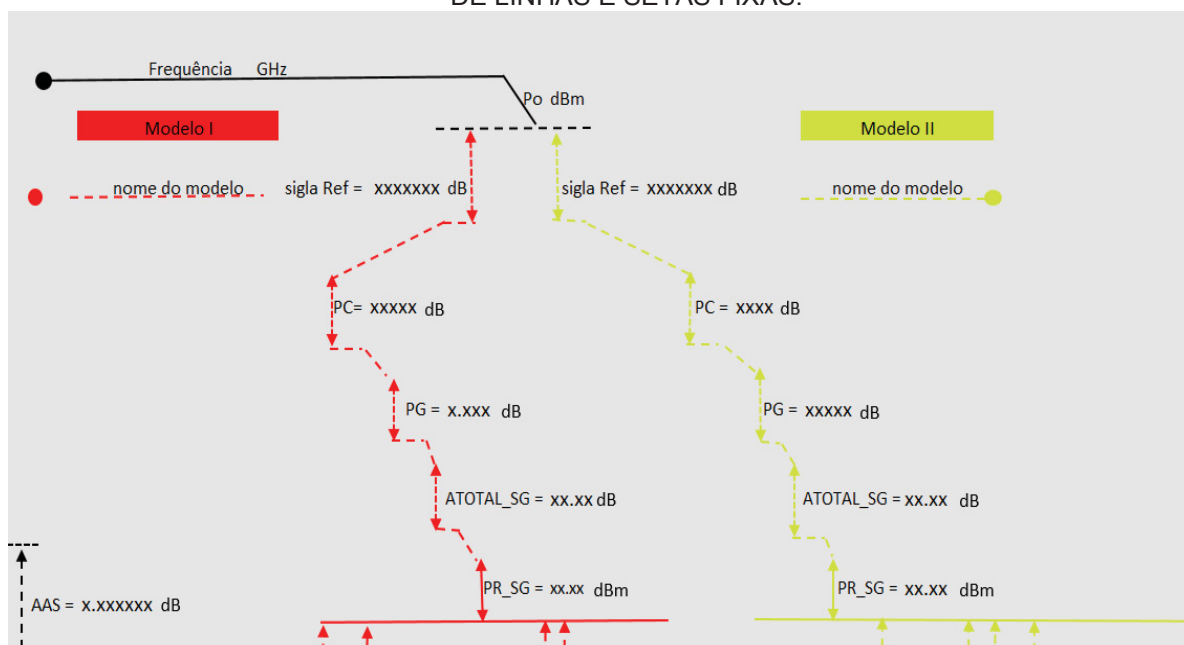
Para este tipo de interface o sistema compara simultaneamente os resultados advindos de dois cenários distintos (considerando dois modelos de propagação diferentes sob análise), mostrando dinamicamente o de menor ou maior eficiência,

considerando o tamanho das barras, onde as cores amarela e vermelha, representam os modelos de predição escolhidos.

O formato e o movimento deste diagrama foram implementados em *JavaScript*, enquanto o algoritmo responsável pelos cálculos matemáticos e pelas análises comparativas entre os resultados, foi programado em PHP.

b) Diagrama de Nivelamento em formato de linhas e setas fixas como mostra a FIGURA 25.

FIGURA 25 – ESTRUTURA DO DIAGRAMA DE NIVELAMENTO NO FORMATO DE LINHAS E SETAS FIXAS.



FONTE: A autora (2020).

Neste formato, os resultados são apresentados por meio de um gráfico de linhas e setas, na direção vertical e horizontal, identificadas com as seguintes convenções:

- Linhas contínuas na direção horizontal na cor amarela representam os valores dos níveis de sinal em [dBm], níveis de ruído em [dBm] e os valores relacionados ao parâmetro de confiabilidade considerando o primeiro Modelo de Propagação escolhido;
- Linhas contínuas na direção horizontal na cor vermelha representam os valores dos níveis de sinal em [dBm], níveis de ruído em [dBm] e os valores relacionados

ao parâmetro de confiabilidade considerando o segundo Modelo de Propagação escolhido;

- Linhas pontilhadas na direção horizontal na cor amarela representam os valores indicativos em [dB] relacionados ao parâmetro do ruído considerando o primeiro Modelo de Propagação escolhido;
- Linhas pontilhadas na direção horizontal na cor vermelha representam os valores indicativos em [dB] relacionados ao parâmetro do ruído considerando o segundo Modelo de Propagação escolhido;
- Setas contínuas na direção vertical na cor amarela representam os valores dos níveis de sinal em [dBm] considerando o primeiro Modelo de Propagação escolhido;
- Setas contínuas na direção vertical na cor vermelha representam os valores dos níveis de sinal em [dBm] considerando o segundo Modelo de Propagação escolhido;
- Setas pontilhadas na direção vertical na cor amarela representam os valores das, perdas em [dB], margens de segurança do sistema em [dB] e ruído em [dB] considerando o primeiro Modelo de Propagação escolhido;
- Setas pontilhadas na direção vertical na cor vermelha representam os valores das, perdas em [dB], margens de segurança do sistema em [dB] e ruído em [dB] considerando o segundo Modelo de Propagação escolhido;
- Linhas contínuas na direção horizontal na cor preta representam valores inerentes a frequência de operação selecionada em [GHz] como a taxa de BER e o limiar de recepção [dBm];
- Setas pontilhadas na direção vertical na cor preta representam os valores indicativos inerentes ao equipamento de recepção que são identificados nos parâmetros da área de assinatura – ASS em [dB] e da margem de desvanecimento dispersivo – MDD em [dB].

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi discutido a metodologia empregada nesta pesquisa, evidenciando os materiais utilizados, assim como o método aplicado para a criação do *software* SINMCEL. A interface do Diagrama de nivelamento foi outro ponto

pertinente, pois procurou-se mostrar os possíveis formatos de análise visual gráfica dentro do sistema.

CAPÍTULO 7 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

7.1 SISTEMA DE TRANSMISSÃO – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA (PARTE 2)

Nesta fase serão descritas as características do cenário de estudo bem como os resultados obtidos através dos Diagramas de Nivelamento.

7.1.2 Especificações das Características Desejadas

Pretende-se neste item, justificar as escolhas relativas ao projeto de Sistema de Transmissão que se deseja implementar. Despreendem-se então os seguintes pontos:

- Ponto de partida do projeto: planejamento de um sistema experimental ponto multiponto (estações fixas);
- Critério de escolhas das estações: resultado de um estudo de campo realizado no setor do Núcleo de Concursos da Universidade Federal do Paraná – NC;
- Pré-requisitos do projeto:
 - ✓ Projeto preliminar da rota: a partir das informações coletadas no estudo de campo do NC, foi realizado um levantamento das *API's* do *Google MAPS* (por inspeção visual), considerando que o sistema a ser desenvolvido deveria contemplar áreas dentro da região urbana densa e urbana de Curitiba;
 - ✓ Croquis da rota: procurou-se seguir a orientação de rodovias existentes, sendo que se evitou a escolha de rotas maiores que 25 km por limitações impostas pelas frequências utilizadas;
 - ✓ Critérios para definição da rota: localização precisa das estações, altura e posicionamento das antenas nas torres, considerações acerca da vegetação, proximidade de aeródromo, e de sistemas de radiodifusão;
 - ✓ Altura da Torre: foi estabelecido que as antenas deveriam ficar no mínimo a 12 m do solo para evitar a indução de ruído de ignição, que é um tipo de ruído produzido pela antena nos equipamentos dentro de *containers*;
 - ✓ Ruído Interferente: em razão dos tipos de polarização, não devem ultrapassar o limite de 4 dB, considerando que o impacto desse tipo de ruído deve ser o mínimo possível em condições ideais de propagação;

- ✓ Relação Sinal/Ruído: recomendado que fique acima dos 30 dB para garantir uma condição mínima de possível degradação do sinal, para um $BER \leq 10^{-4}$;
- ✓ Margem de Desvanecimento: quanto maior for a margem melhor será o comportamento do *link* a possíveis mudanças no ambiente e maior será a sua confiabilidade. Logo recomenda-se que este valor fique acima de 35 dB para garantir em uma confiabilidade alta (ex. 99,999%) do sistema.

7.2 RESULTADOS REFERENTES A GEOMETRIA

Como o objetivo neste ponto é a projeção de um sistema ponto multiponto de estações fixas, foi necessário primeiramente realizar os cálculos por meio das equações (25) a (31) apresentadas anteriormente no capítulo 5. Isto posto, cinco *links* em distâncias distintas, cobrindo a região urbana e urbana de Curitiba foram selecionados e sumarizados na TABELA 18:

TABELA 18 – RESULTADOS REFERENTES A GEOMETRIA DOS SITES.

		Link 1 (UT_CP)	Link 2 (UT_SA)	Link 3 (UT_P)	Link 4 (CP_SA)	Link 5 (CP_P)
Ponto A Graus	Latitude	- 25,4283	- 25,4283	- 25,4283	- 25,4499	- 25,4499
	Longitude	- 49,2733	- 49,2733	- 49,2733	- 49,2339	- 49,2339
Ponto B Graus	Latitude	- 25,4499	- 25,4135	- 25,4465	- 25,4135	- 25,4465
	Longitude	- 49,2339	- 49,2492	- 49,3589	- 49,2492	- 49,3589
Distância	d (km)	4,63	2,93	8,83	4,33	12,56
Altitude	Ponto A	922	922	922	914	914
	Ponto B	914	916	939	916	939
Azimute em A e B (graus)	B→A	58,6502	124,2367	76,6900	159,3108	91,6980
	A→B	301,3439	235,7632	283,,3099	200,6891	268,3019
Ângulo de Elevação (graus)	AE	- 0,0052	- 0,0032	- 0,0099	- 0,0048	- 0,0141

FONTE: *Software* SINMCEL (2020).

Onde:

UT – Representa o site na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR;

CP – Representa o site na Universidade Federal do Paraná Campus Centro Politécnico;

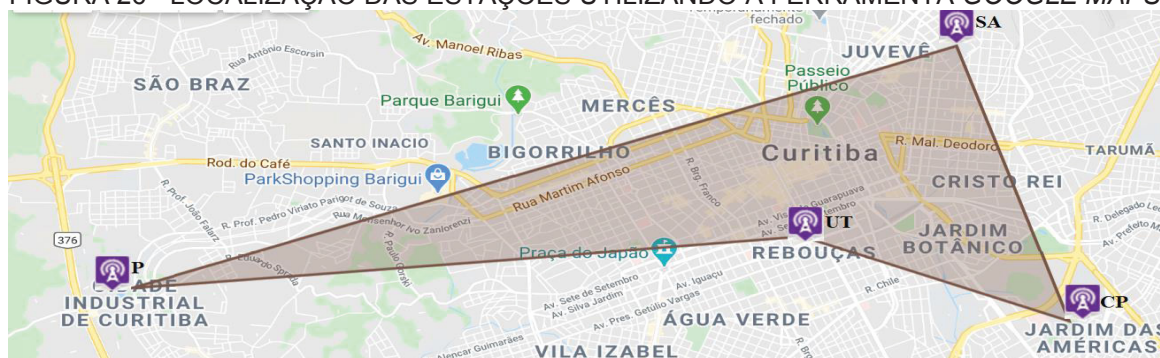
SA – Representa o site no Núcleo de Concursos UFPR Campus Agrárias;

P – Representa o site na Universidade Positivo (campo comprado).

7.2.1 Análise Gráfica

Uma vez tendo sido verificado os resultados referentes à geometria das estações que compõem o sistema, observou-se também o resultado visual como mostra a FIGURA 26:

FIGURA 26 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES UTILIZANDO A FERRAMENTA GOOGLE MAPS.



FONTE: GOOGLE MAPS.

7.3 RESULTADOS E ANÁLISES ATRAVÉS DOS DIAGRAMAS DE NIVELAMENTO PARA O LINK (UT_CP)

Neste ponto do trabalho, foi utilizado a ferramenta SINMCEL para realizar inúmeras simulações dentro do estudo de caso proposto. A primeira simulação foi feita para o *link* (UT_CP), na frequência de 3,5 GHz, utilizando os modelos de propagação *Longley Rice* e *Sui*. Os demais parâmetros de entrada considerados para este cenário são mostrados na FIGURA 27.

FIGURA 27 – PARÂMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DO LINK (UT_CP)

PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA	CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO Tx	CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO Rx
FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO (GHz)	POTÊNCIA TRANSMITIDA (dBm)	POTÊNCIA LIMAR (dBm)
3.5	28	-89
FAIXA DE FREQUÊNCIA (MHz)	E.I.R.P (dBm)	GANHO DA ANTENA (dBi)
3500 à 3510	46.9	25.0
MODELO DE PROPAGAÇÃO ESCOLHIDO	GANHO DA ANTENA (dBi)	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi)
MODELO I Longley Rice	24.0	horizontal
MODELO II Sui	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi)	ALTURA DA ANTENA (m)
	horizontal	40
	ALTURA DA ANTENA (m)	BER
	35	10^{-4}
	PERDA DEVIDO AO CABO (dB)	PERDA DEVIDO AO CABO (dB)
	4.5	1
	PERDA DEVIDO O CONECTOR (dB)	PERDA NO CONECTOR (dB)
	0.3	0.2

FONTE: Tela capturada do *software* SINMCEL (2020).

Como foi observado na FIGURA 27, os parâmetros de entrada exigidos no sistema vão desde a definição da frequência de operação até a escolha do dois

modelos, que serão analisados na simulação. De acordo com o que foi abordado previamente no Capítulo 6, deste trabalho, sabe-se que o *software* SINMCEL além de realizar simulações com diversas frequências, também, oferece a possibilidade do usuário de utilizar dados de entrada (valores indicativos) tecnicamente confiáveis (conforme recomendações técnicas específica para cada frequência ou norma legais descritos no item 2.3 do capítulos 2 e no item 5.4, do capítulo 5, nos tópicos de especificações de antenas, cabos e conectores) e sugeridos pela própria ferramenta como uma opção de escolha para análise. Portanto, a simulação realizada no *link* (UT_CP) utilizou parte desses valores indicativos fornecidos pela plataforma.

As alturas das antenas foram determinadas a partir da localização geográfica das estações (segundo o estudo de campo realizado no NC). Deve-se ressaltar, que a ferramenta SINMCEL permite alturas de antenas de até 100 metros, que correspondem ao limite máximo estabelecido pelo decreto 606 para cidade de Curitiba. Logo, a altura da antena da estação UT é de 35 metros de comprimento, enquanto para a estação CP o valor é de 40 metros. Vale lembrar que as antenas utilizadas no *link* foram nos modelos JRB-25 e JRB-19, as quais correspondem aos sites CP e UT respectivamente.

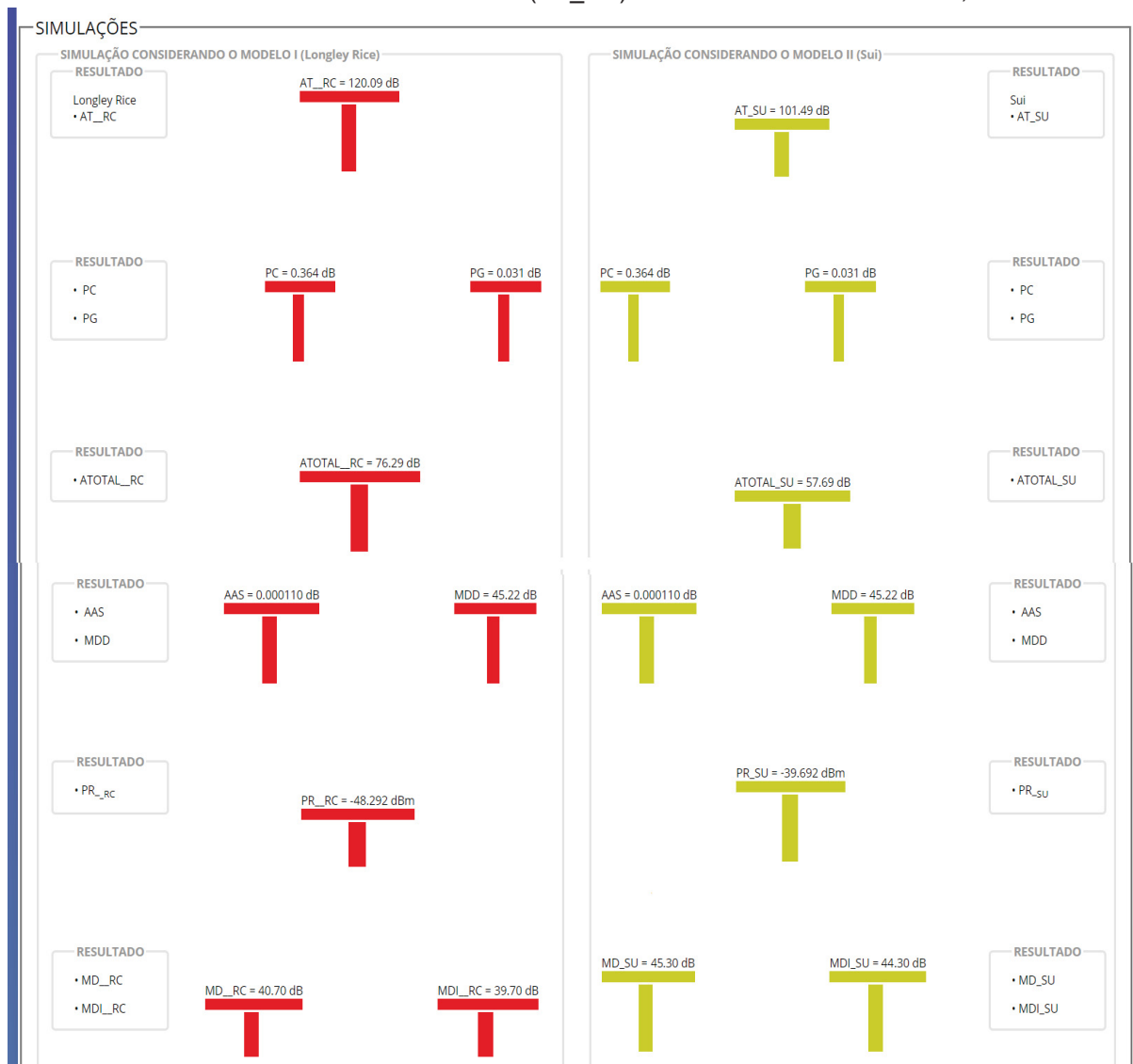
A faixa de frequência de operação escolhida foi a de 3500 MHz a 3510 MHz com uma largura de banda de 10 MHz. Os ganhos de cada antena, assim como a perda devido ao cabo (modelo utilizado foi o HF 1 5/8", conforme mostrado na Tabela 14), ao conector (modelo utilizado foi RGE – M) e a Potência limiar (sensibilidade do receptor) seguiram os valores indicativos (especificações discutidas nos itens 6, 7 e 8 do Capítulo 2) sugeridos pela ferramenta.

A potência máxima permitida e transmitida para a frequência de 3,5 GHz é de 33 dBm, considerando um E.I.R.P de 53 dBm. Neste caso, por se tratar de um *link* relativamente curto, foi utilizado uma potência 28 dBm para um valor de E.I.R.P de 47.5 dBm, que garantia um resultado satisfatório após a realização de alguns testes.

Os modelos de propagação selecionados para esta simulação foram os de *Longley Rice* – escolhido como opção I e *Sui* como II opção para análise. O critério de escolha partiu da seguinte premissa: este enlace está localizado dentro de uma região urbana densa da cidade, o que corresponde a algumas características de aplicabilidade para qual ambos modelos seriam indicados para uso (tópico abordado anteriormente no Capítulo 4).

A partir dos dados de entrada preenchidos na ferramenta, o sistema processou todas as informações e apresentou seus resultados através da técnica do Diagrama de Nivelamento, sendo ele do tipo dinâmico ou estático. Por motivo de estruturação desse documento e da necessidade de qualidade visual gráfica, o Diagrama de Nivelamento Dinâmico será apresentado em três partes. A primeira será referente aos resultados dos parâmetros de perdas e de potência; em seguida, apresenta-se os resultados provenientes dos ruídos e, por fim, da confiabilidade. Portanto, a FIGURA 28 mostra a primeira parte do Diagrama de Nivelamento.

FIGURA 28 – DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE PERDAS E DE POTÊNCIA DO *LINK* (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.



FONTE: Tela capturada do *software* SINMCEL (2020).

De acordo com os resultados mostrados na FIGURA 28 é possível realizar algumas análises nesta parte do diagrama. Primeiramente, vale lembrar que o diagrama de nivelamento dinâmico utiliza um movimento de calibração (movimento de distensão e contenção da barra) em sua estrutura, fazendo com que o algoritmo (lógica implementada em PHP e *JavaScript*), que age por traz dessa plataforma, seja capaz de observar e comparar os resultados obtidos na simulação, e também apresentá-los através do gráfico de forma inteligente. Evidenciando quais resultados são indiferentes, melhores ou piores dentro de um determinado *link*, quando se analisa simultaneamente dois modelos matemáticos.

Tomando por base está informação, pôde-se perceber, instantaneamente, quando se fez a comparação dos resultados referentes à atenuação provocada apenas pela ação do modelamento do canal, que a resposta dada pelo modelo II (representado pela sigla AT_SU no diagrama, na barra 1 de cor verde) foi melhor do que a fornecida pelo Modelo I (representado pela sigla AT_RC no diagrama, na barra 1 de cor vermelha). Ou seja, segundo o diagrama, a atenuação calculada para o modelo do *Longley Rice* foi de 120,09 dB, enquanto para o Modelo *Sui* foi um valor menor, de 101,49 dB. Esta diferença de valores entre eles, pode ser explicado pelas particularidades que cada um dos modelos adotaram como critério de análise.

Por exemplo, o Modelo I considera no seu modelamento matemático os efeitos do fenômeno da difração e do espalhamento, quando não se tem uma linha de visada direta entre as antenas do *link*. Já o Modelo II avalia o efeito do sombreamento em maior ou menor intensidade para diferentes tipos de terreno. Isto posto, ao se analisar pontos específicos como estes citados a pouco, deve-se considerar que o resultado obtido reproduz em maior ou menor grau as particularidades de cada modelo.

Quanto aos parâmetros referentes a perda, devido à chuva (representado pela sigla PC no diagrama na barra 2) e aos gases atmosféricos (representado pela sigla PG no diagrama na barra 3), pode-se dizer que ambos estão diretamente relacionados a frequência utilizada, que, neste caso, foi de 3,5 GHz. Do exposto, os valores obtidos para a simulação, tanto para o cenário do Modelo I quanto o cenário do Modelo II, foram de 0,364 dB de perda devido à chuva, e de 0,031 dB em razão dos gases atmosféricos. Apesar desses resultados não representarem nem sequer 1 dB de perda dentro do *link*, eles não devem ser desprezados de nenhuma análise, visto que

na medida em que se trabalha com frequências mais altas estes mesmos parâmetros passam a provocar uma perda considerável dentro do enlace, como será visto em simulações futuras.

Com relação a atenuação total líquida, o melhor resultado apresentado foi dado pelo cenário do Modelo II, no valor de 57,69 dB (representado pela sigla ATOTAL_SU, na barra 4 de cor verde) do *link* (UT_CP).

Em contrapartida, o cenário do Modelo I apresentou um valor de atenuação total de 76,29 dB (representado pela sigla ATOTAL_RC, na barra 4 de cor vermelha). Uma sugestão, que pode ser adotada, é utilizar antenas com ganhos maiores ou até mesmo cabos com perdas menores, com o propósito de tentar diminuir a atenuação neste cenário.

Outra observação pertinente está relacionada a finalidade de definir a área de assinatura (representado pela sigla AAS no diagrama, na barra 5) e a margem de desvanecimento dispersivo (representado pela sigla MDD no diagrama, na barra 6) dentro do *link*, que pode ser explicado pelo fato de que estes parâmetros são importantes para se avaliar a qualidade do equipamento de recepção, visando ao estabelecimento de um limite tolerável diante de uma possível inoperância. Esse limite torna-se necessário, devido às possíveis distorções, que o sinal sofre ao longo da propagação, causadas, muitas vezes, pelo efeito dos múltiplos percursos. Sendo assim, os valores obtidos para a simulação, considerando tanto o Modelo I bem como o Modelo II, foram de 0,000110 dB de área de assinatura, e de 45,22 dB de margem de desvanecimento dispersivo. Esses resultados se encontram dentro do valor esperado, segundo as referências técnicas do ETSI e do ITU-R F.1093 (o valor da área de assinatura – AAS não deve exceder o padrão de 1,573 dB, assim como o valor da margem de desvanecimento dispersivo – MDD é tolerável em até 51 dB para as frequências de 3 GHz a 15 GHz).

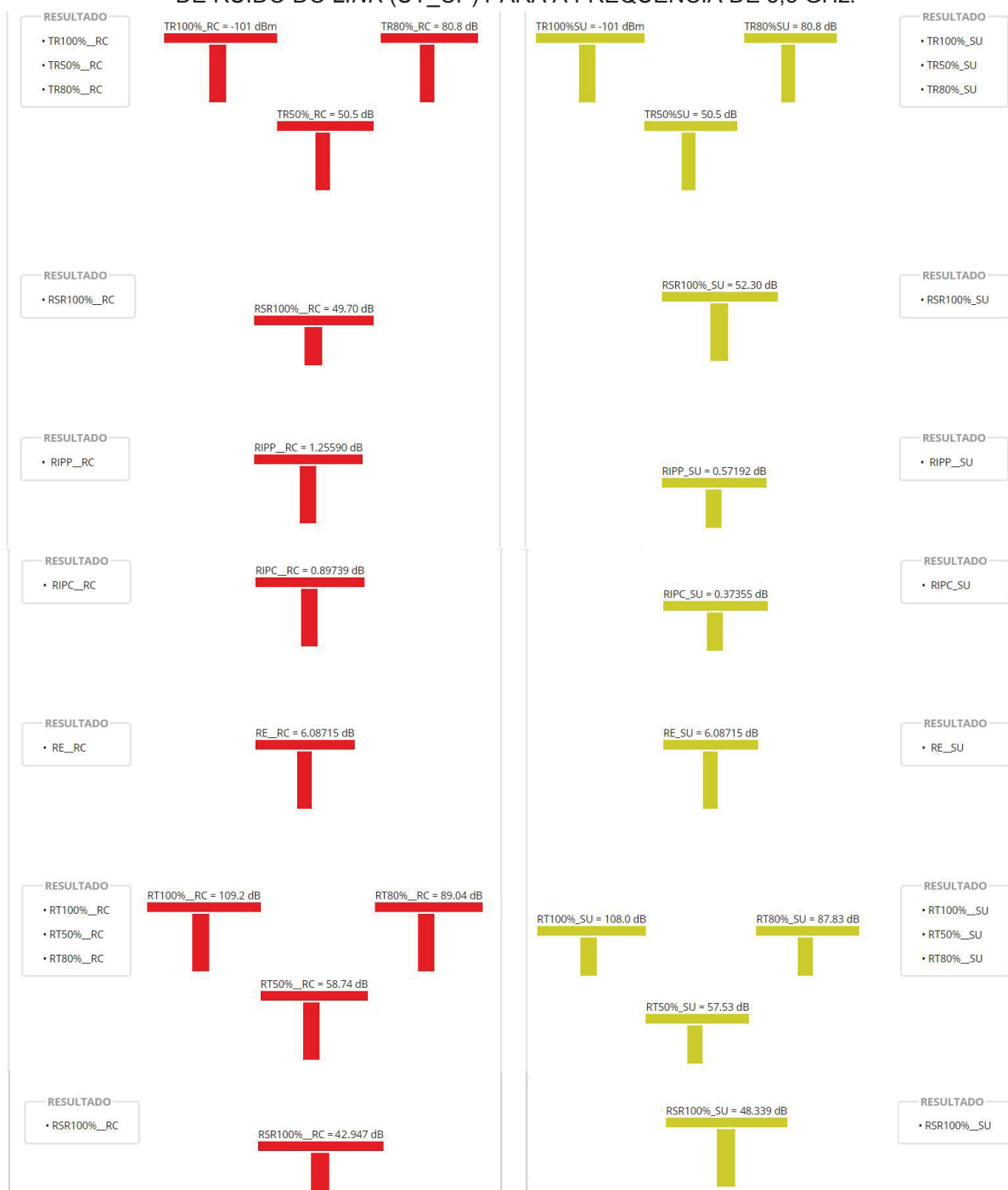
Outro ponto importante para se analisar neste *link* é sobre os parâmetros relativos a potência. De acordo com o Diagrama de Nivelamento, os resultados referentes a potência recebida, margem de desvanecimento e a margem de desvanecimento por interferências obtidas na simulação, a qual considerou o Modelo II para análise, apresentaram respostas melhores do que as fornecidas pelo cenário do Modelo I. Faz-se necessário perceber, conforme foi apresentado nos parâmetros de entrada da ferramenta, que a potência limiar (ou sensibilidade do receptor) utilizada

foi a sugerida pelo *software*, que indicou o valor de -89 dBm para um BER de 10^{-4} (critérios detalhados e discutidos no Capítulo 2 desse trabalho).

Isto posto, enquanto a simulação que considerou o Modelo I para análise resultou em: uma potência recebida de $-48,29$ dBm (representado pela sigla PR_RC no diagrama, na barra 7 de cor vermelha), uma margem de desvanecimento de $40,70$ dB (representado pela sigla MD_RC no diagrama, na barra 8 de cor vermelha) e uma margem de desvanecimento por interferências de $39,70$ dB (representado pela sigla MDI_RC no diagrama, na barra 9 de cor vermelha). O Modelo II apresentou como resultados uma potência recebida superior, no valor de $-39,69$ dBm (representado pela sigla PR_SU no diagrama, na barra 7 de cor verde), uma margem de desvanecimento de $45,30$ dB (representado pela sigla MD_SU no diagrama, na barra 8 de cor verde) e uma margem de desvanecimento por interferências de $44,30$ dB (representado pela sigla MDI_SU no diagrama, na barra 9 de cor verde).

Apesar das diferenças dos valores obtidos entre os cenários de análise, é notório observar que, para ambas simulações, tanto a potência recebida quanto o MD e o MDI apresentaram resultados dentro do esperado (segundo a resolução 548 da Anatel), se for considerado que a potência transmitida para esta frequência poderia atingir até 30 dBm. Portanto, após essas análises realizadas, na primeira parte do Diagrama de Nivelamento Dinâmico, serão avaliados os parâmetros relativos aos ruídos do *link* como mostra a FIGURA 29.

FIGURA 29 – DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE RUÍDO DO *LINK* (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.



FONTE: *Software SINMCEL* (2020).

O ambiente propício com maior probabilidade de ocorrer interferência de ruído se dá em regiões urbanas (densa e suburbana).

Logo, a FIGURA 29 mostra os principais tipos de ruído comuns ao Sistema de Transmissão. O primeiro parâmetro a ser determinado foi o ruído térmico, que representa um fator inerente de todo, e qualquer, equipamento eletrônico, ou seja, sua

presença é inevitável no sistema. Outro ponto a ser levantando, é que este ruído está diretamente relacionado a frequência e a largura de banda de operação e, por esse motivo, tornou-se necessário calcular a atuação dele para 100%, 80% e 50% do tempo em que o *link* está em operação.

Sendo assim, os valores encontrados na simulação, considerando o Modelo I bem como o Modelo II, resultaram em um nível de ruído térmico de -101 dBm para a atuação em 100% do tempo (representado pela sigla TR100%_RC ou pela sigla TR100%_SU no diagrama, na barra 10). Enquanto a contribuição do ruído térmico para 80% do tempo foi de 80,8 dB (representado pela sigla TR80%_RC ou pela sigla TR80%_SU no diagrama, na barra 12) e para a atuação em 50% do tempo de 50,5 dB (representado pela sigla TR50%_RC ou pela sigla TR50%_SU no diagrama, na barra 11).

Vale lembrar que o cálculo realizado para a contribuição do ruído em 50% e 80% do tempo, representam apenas uma boa prática técnica de se prever todos os possíveis cenários de ocorrência, quando considera-se o uso da tecnologia *Time Division Duplexing* - TDD, ou seja, esses parâmetros são meramente indicativos.

Já em relação ao entendimento da associação entre o sinal e o ruído, conhecido pela sigla RSR, foi um ponto de suma importância para análise do *link*, pelo fato de que este parâmetro permite avaliar a qualidade do sinal recebido. Na ferramenta SINMCEL, a RSR é analisada em dois momentos: no primeiro, esta relação é calculada em função da potência recebida e do nível de ruído térmico para 100% do tempo (procedimento habitual feito no *link*). Já no segundo momento que será analisado mais à frente, a RSR é definida em função da potência recebida e do ruído total para 100% do tempo, ou seja, nesse procedimento todos os ruídos analisados neste trabalho serão considerados na análise.

Isso posto, como RSR tem a função de dizer qual a “probabilidade” do sinal recebido, na entrada do receptor, ser somente ruído ou um sinal aceitável, foi realizada a simulação considerando o cenário do Modelo I, que encontrou uma RSR de 49,70 dB (representado pela sigla RSR100%_RC no diagrama, na barra 13 de cor vermelha). Enquanto, para o cenário do Modelo II, a RSR foi de 52,30 dB (representado pela sigla RSR100%_SU no diagrama, na barra 13 de cor verde). Nesse caso, o resultado obtido pelo modelo II foi mais satisfatório do que o apresentado pelo modelo I, quando se avalia uma possível degradação do sinal.

Com relação aos ruídos interferentes, devido aos tipos de polarização, pode-se dizer que representam outro ponto importante de ser analisado, pelo fato de auxiliarem na diminuição da vulnerabilidade de interferências entre os links. Neste trabalho, foram considerados o ruído interferente devido à polarização paralela – RIPP e o ruído interferente devido a polarização cruzada – RIPC. O RIPP representa uma prática preventiva para o caso em que os *links* de transmissão compartilhem a mesma faixa de operação e utilizem também antenas com o mesmo sentido de polarização (seja vertical ou horizontal). Já o RIPC é pertinente na medida do aumento da necessidade de se projetar Sistemas de Transmissão que suportem altas taxas de transmissão e serviços diferenciados, e para esses casos aplica-se a técnica de se usar antenas com polarizações alternadas.

Portanto, de acordo com os resultados apresentados pelo Diagrama de Nivelamento para a simulação que considerou o cenário do Modelo I, tem-se o valor de 1,2559 dB de RIPP (representado pela sigla RIPP100%_RC no diagrama, na barra 14 de cor vermelha) e de 0,8973 dB de RIPC (representado pela sigla RIPC100%_RC no diagrama, na barra 15 de cor vermelha) no entanto para o cenário do Modelo II os valores obtidos foram 0,5719 dB de RIPP (representado pela sigla RIPP100%_SU no diagrama, na barra 14 de cor verde) e de 0,3735 dB de RIPC (representado pela sigla RIPC100%_SU no diagrama, na barra 15 de cor verde).

A partir desses valores, percebeu-se que, apesar do cenário de análise do Modelo I apresentar novamente o resultado mais desfavorável, para ambos cenários de simulação, a atuação dos ruídos interferentes, devido aos tipos de polarização, foram os mínimos possíveis, não passando de 1,3 dB para o pior caso.

Com relação ao ruído causado pelo Eco apresentado e definido anteriormente no Capítulo 5, o resultado obtido tanto para a simulação, considerando o Modelo I, quanto o Modelo II, o valor de 6,0871 dB (representado pela sigla RE_RC no diagrama, na barra 16 de cor vermelha ou pela sigla RE_SU no diagrama, na barra 16 de cor verde).

Isso posto, o próximo ponto a se discutir é justamente o ruído total, que representa nada mais do que, a soma de todos os ruídos atuantes sobre o enlace. Segundo as normas técnicas do ITU-R SM.329-12, o patamar de ruído segue uma condição variando conforme a frequência utilizada. Para frequências de 3 GHz a 15 GHz aplica-se a recomendação seguinte: o ruído total, não deve ultrapassar o limite

de $TR + 25$; onde TR representa o ruído térmico e o 25, o valor máximo tolerável de outras fontes de ruído no *link*. Essa condição é indicada para enlaces do tipo ponto – multiponto e para distância de até 15 km.

Tendo por base essa informação, a simulação que apresentou o melhor resultado em relação ao ruído total foi a que considerou o cenário do Modelo II. Neste caso, o valor do ruído total para 100% do tempo foi de 108 dB (representado pela sigla RT100%_SU no diagrama, na barra 17 de cor verde). Enquanto que, para o ruído total considerando 80% e 50% do tempo, foram os valores de 87,83 dB (representado pela sigla RT80%_SU no diagrama, na barra 19 de cor verde) e de 57,53 dB (representado pela sigla RT50%_SU, no diagrama na barra 18 de cor verde) respectivamente.

Já os resultados referentes a simulação que considerou o cenário no Modelo I, resultou em um ruído total para 100% do tempo no valor de 109,2 dB (representado pela sigla RT100%_RC no diagrama, na barra 17 de cor vermelha) enquanto o ruído total para 80% do tempo o valor foi de 89,04 dB (representado pela sigla RT80%_RC no diagrama, na barra 19 de cor vermelha) e para 50% do tempo de 58,74 dB (representado pela sigla RT50%_RC no diagrama, na barra 18 de cor vermelha). De acordo com a recomendação do ITU, os ruídos produzidos por outras fontes como por exemplo: polarização paralela, cruzada e de eco, somados atingiram o patamar de ruído de 6 dB a 7 dB no máximo, ou seja, não excederam o limite recomendado.

Finalmente, para fechar as discussões dessa segunda parte do diagrama de nivelamento, foi necessário realizar uma análise a respeito da RSR novamente, quando considerou-se a atuação de todos os ruídos do *link* e não mais a contribuição do ruído térmico para 100% do tempo apenas. Portanto, de acordo com os resultados encontrados, foi percebido novamente que a simulação baseada no cenário do Modelo II apresentou o melhor resultado em relação ao cenário do Modelo I. Logo, a simulação, considerando o Modelo II para RSR, obteve como resposta o valor de 48,33 dB (representado pela sigla RSR_SU no diagrama, na barra 20 de cor verde); enquanto que a RSR, para o cenário do Modelo I, foi o valor de 42,94 dB (representado pela sigla RSR_RC no diagrama, na barra 20 de cor vermelha). Apesar desses resultados serem um pouco mais pessimistas do que aqueles que foram apresentados na primeira análise, eles, representam um cenário um pouco mais realista do que de fato pode ocorrer com o sinal dentro do *link*, se o impacto do ruído gerado por outra fontes além do ruído térmico forem considerados.

Após, as discussões realizadas sobre a segunda parte do diagrama, restam apenas analisar os parâmetros relativos a confiabilidade que estão apresentados na FIGURA 30.

FIGURA 30 - DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE DO *LINK* (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.



FONTE: *Software SINMCEL* (2020).

Os parâmetros mostrados, na FIGURA 30, configuram a parte final de um sistema de transmissão. Sabe-se, que quando se trata de mensurar a confiabilidade de um *link*, é necessário ter em mente, que esta medida se traduz como sendo a habilidade, na qual o sistema executa suas funções dentro de limites bem como as condições operacionais durante um tempo definido. Por este motivo, o primeiro parâmetro a ser definido foi justamente a probabilidade de ocorrer uma inoperância no sistema em razão do desvanecimento seletivo e não seletivo.

Conforme foi explicado precedentemente no Capítulo 5, a inoperância em razão dos desvanecimentos não seletivo-PIDNS corresponde a pequenas variações que o sinal sofre ao longo do percurso, provocado muitas vezes pelo efeito atmosférico ou até mesmo devido à chuva. Já a inoperância, em razão dos desvanecimentos

seletivo-PIDS, caracteriza-se pelas variações rápidas que o sinal sofre devido ao efeito dos múltiplos percurso.

Segundo a recomendação do ITU-R P.530-14, a PIDNS não deve exceder o valor de $2,5 \times 10^{-06} \%$, quando a margem de desvanecimento do *link* está acima de 42 dB, caso contrário, o valor de referência que deve ser adotado é o de $1,95 \times 10^{-09} \%$. A PIDS está diretamente associada à área de assinatura, ou seja, quanto menor for o valor da área, menor será a probabilidade de ocorrer inoperância em razão do desvanecimento seletivo (valor padrão de referência é $15,2 \times 10^{-07} \%$).

Sendo assim, o resultado da simulação da probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento não seletivo, considerando o cenário do Modelo I, foi o valor de $1,6809 \times 10^{-10} \%$ (representado pela sigla PINDS_RC, no diagrama, na barra 21 de cor vermelha). Enquanto a simulação que considerou o cenário do Modelo II o valor foi de $1,2177 \times 10^{-10} \%$ (representado pela sigla PINDS_SU no diagrama na barra 21 na cor verde), ou seja, o modelo II obteve o valor mais favorável dentro da simulação em relação ao modelo I.

Já o parâmetro da probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento seletivo, calculado tanto para a simulação, no o Modelo I quanto para o Modelo II, resultou no valor de $9,8331 \times 10^{-10} \%$ (representado pela sigla PIDS_RC no diagrama, na barra 22 de cor vermelha ou pela sigla PIDS_SU no diagrama, na barra 22 de cor verde). Vale ressaltar, que apesar de ambos cenários de simulação apresentarem diferenças entre em seus resultados, ainda permanecem com os seus valores dentro do limite recomendado.

Em relação a análise da probabilidade do período de inoperância total em minutos por ano – PITMA, pode-se dizer que representa uma medida a mais ao sistema, quando se considera situações anômalas, podendo ocorrer em um determinado período de tempo. De acordo com essa informação, o PITMA encontrado para a simulação, que considerou o cenário do Modelo I, foi o valor de 1,2275 m/A (representado pela sigla PITMA_RC no diagrama, na barra 23 de cor vermelha); ao passo que, para o cenário de análise do Modelo II, o valor foi de 2,6642 m/A (representado pela sigla PITMA_SU no diagrama, na barra 23 de cor verde), ou seja, neste caso o resultado obtido pela simulação do cenário do Modelo I obteve o valor mais favorável.

Outro fator, pertinente para se determinar no sistema, é a porcentagem de tempo de operação, que em linhas gerais significa saber o período em que o *link* opera no seu limite ou abaixo de um valor máximo definido pela potência limiar. Sendo assim, a porcentagem de tempo de operação calculada para cenário do Modelo I foi de 99,9999987% (representado pela sigla PTO_RC no diagrama, na barra 24 de cor vermelha) e para o cenário do Modelo II foi o valor de 99,9999991% (representado pela sigla PTO_SU no diagrama, na barra 24 de cor verde). Diante desses resultados, entende-se que a porcentagem de tempo de operação foi maior no cenário que considerou o modelo II.

E por fim, o último parâmetro dessa simulação a ser discutido é justamente a confiabilidade do sistema. Isso posto, entende-se que uma confiabilidade para ser considerada eficiente precisa que o sistema opere sem falhas ou interrupções ao longo de um intervalo de tempo, ou seja, quanto maior for o tempo de operação do *link* melhor é a sua confiabilidade.

Logo, de acordo com análise anterior, a simulação que apresentou o melhor resultado foi a que considerou o cenário do Modelo II, com uma confiabilidade de 99,999941% (representado pela sigla CONF_SU, no diagrama, na barra 25 da cor verde); enquanto que para o cenário que considerou o Modelo I a confiabilidade encontrada foi de 99,995751% (representado pela sigla CONF_RC, no diagrama, na barra 25 de cor vermelha).

Tendo por base essas análises discutidas nesse tópico, notou-se que através do Diagrama de Nivelamento Dinâmico foi possível analisar o *link* (UT_CP), explorando todas as informações e observações pertinentes sobre todos os resultados obtidos. Sendo assim, chegou-se à seguinte conclusão: os resultados encontrados pela simulação de análise do cenário do modelo de propagação *Longley Rice*, apresentaram as respostas mais favoráveis em relação ao sistema, com a exceção apenas do parâmetro de probabilidade do período de inoperância total em minutos por ano, que, no cenário de análise do modelo Sui, obteve um valor mais favorável.

7.3.1 Análise através do Diagrama de Nivelamento Estático (para o *link* UT_CP)

O Diagrama de Nivelamento Estático representa uma segunda forma de se enxergar os parâmetros que compõe um Sistema de Transmissão, como foi explicado

anteriormente no Capítulo 6. Este gráfico é constituído por uma estrutura fixa composta de linhas e setas que tem a finalidade de analisar simultaneamente modelos de propagação, bem como os elementos que englobam um sistema e compara-los em seus respectivos resultados. Portanto, neste formato de apresentação do diagrama as linhas e setas na direção vertical e horizontal, seguem as seguintes convenções que serão apresentadas na TABELA 19.

TABELA 19 – Identificação dos componentes que estruturam o Diagrama de Nivelamento Estático.

Identificação das linhas contínuas horizontais	
Linhas contínuas na posição horizontal, na cor amarela representam os valores dos níveis de sinal em [dBm], níveis de ruído em [dBm] e os valores relacionados ao parâmetro de confiabilidade considerando o cenário de análise do primeiro Modelo de Propagação escolhido;	Linhas contínuas na posição horizontal, na cor vermelha representam os valores dos níveis de sinal em [dBm], níveis de ruído em [dBm] e os valores relacionados ao parâmetro de confiabilidade considerando o cenário de análise do segundo Modelo de Propagação escolhido;
Identificação das linhas pontilhadas horizontais	
Linhas pontilhadas na posição horizontal, na cor amarela representam os valores indicativos em [dB] relacionados ao parâmetro do ruído considerando o primeiro Modelo de Propagação escolhido;	Linhas pontilhadas na posição horizontal, na cor vermelha representam os valores indicativos em [dB] relacionados ao parâmetro do ruído considerando o segundo Modelo de Propagação escolhido;
Identificação das setas contínuas verticais	
Setas contínuas na posição vertical, na cor amarela representam os valores dos níveis de sinal em [dBm] considerando o primeiro Modelo de Propagação escolhido.	Setas contínuas na posição vertical, na cor vermelha representam os valores dos níveis de sinal em [dBm] considerando o segundo Modelo de Propagação escolhido.
Identificação das setas pontilhadas verticais	
Setas pontilhadas na posição vertical, na cor amarela representam os valores das, perdas em [dB], margens de segurança do sistema em [dB] e ruído total em [dB] considerando o primeiro Modelo de Propagação escolhido;	Setas pontilhadas na posição vertical, na cor vermelha representam os valores das, perdas em [dB], margens de segurança do sistema em [dB] e ruído total em [dB] considerando o segundo Modelo de Propagação escolhido;
OBS (1): Linhas contínuas na posição horizontal, na cor preta representam valores inerentes a frequência de operação selecionada em [GHz] como a taxa de BER e o limiar de recepção [dBm];	
OBS (2): Setas pontilhadas na posição vertical, na cor preta representam os valores indicativos inerentes ao equipamento de recepção que são identificados nos parâmetros da área de assinatura – ASS em [dB] e da margem de desvanecimento dispersivo – MDD em [dB].	

FONTE: *Software SINMCEL* (2019).

A FIGURA 31 apresenta os parâmetros de entrada do *software* SINMCEL, que foram utilizados para a simulação do *link* (UT_CP), considerando a frequência de operação de 5,8 GHz.

FIGURA 31 – PARAMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DO *LINK* (UT_CP) CONSIDERANDO O DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO.

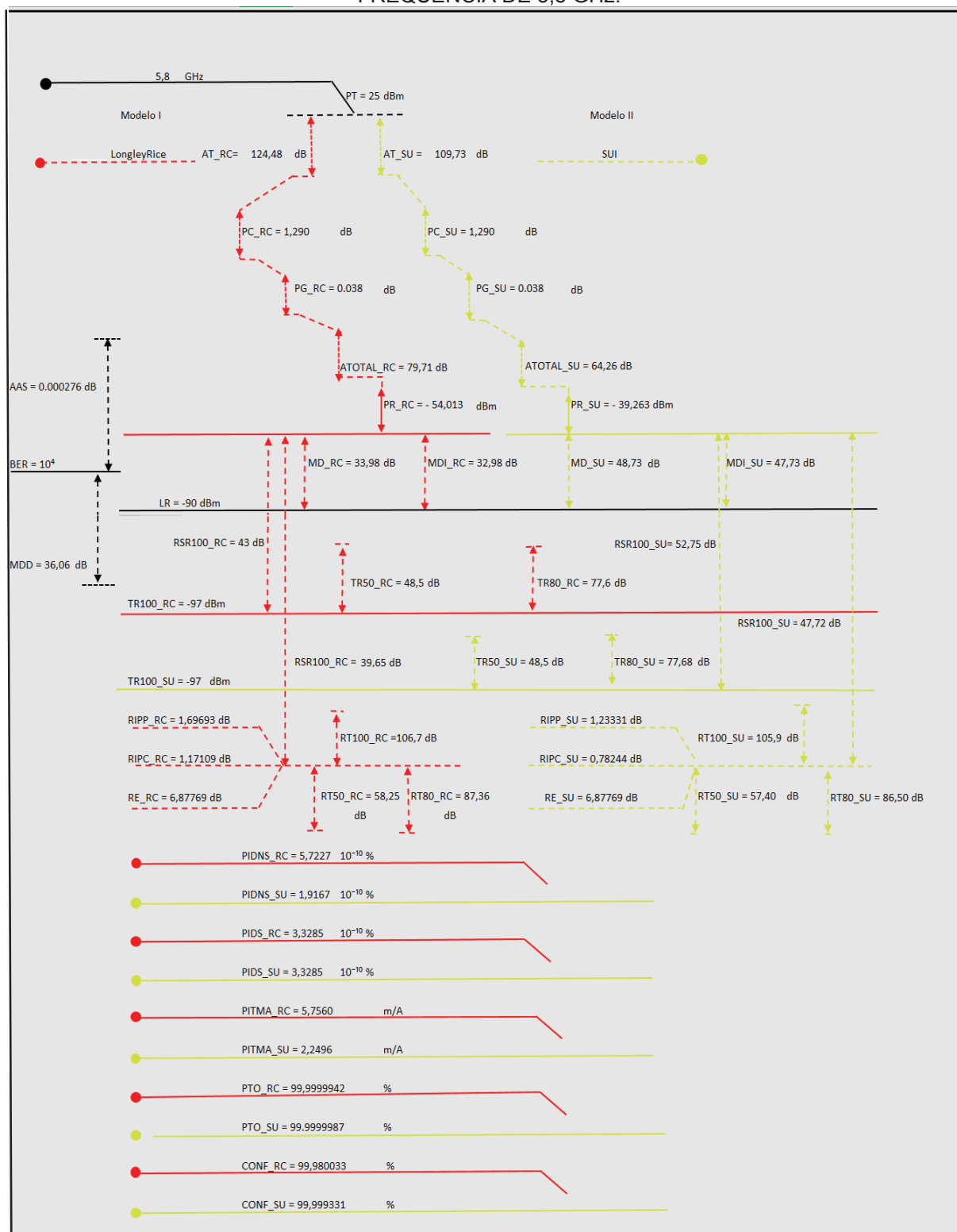
PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA	POTÊNCIA TRANSMITIDA (dBm)	POTÊNCIA LIMIAR (dBm)
FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO (GHz) 5.8	25	-88
FAIXA DE FREQUÊNCIA (MHz) 5725 à 5750	E.I.R.P (dBm) 45.5	GANHO DA ANTENA (dBi) 27.0
	GANHO DA ANTENA (dBi) 26.0	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi) horizontal
MODELO DE PROPAGAÇÃO ESCOLHIDO	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi) horizontal	ALTURA DA ANTENA (m) 40
MODELO I Longley Rice	ALTURA DA ANTENA (m) 35	BER 10^{-4}
MODELO II Sui	PERDA DEVIDO AO CABO (dB) 4.5	PERDA DEVIDO AO CABO (dB) 1
	PERDA DEVIDO O CONECTOR (dB) 0.4	PERDA NO CONECTOR (dB) 0.2

FONTE: Tela capturada do software SINMCEL (2020).

Como foi observado na FIGURA 31, a frequência de operação escolhida foi de 5,8 GHz operando em uma faixa de frequência de 5725 MHz a 5750 MHz com uma largura de banda de 25 MHz. Por se tratar do mesmo *link* analisado no Diagrama Dinâmico, no que se refere a localização geográfica das estações, foram assumidas as mesmas alturas das antenas da simulação anterior. A potência transmitida máxima permitida para a frequência de 5,8 GHz é limitada em 30 dBm, considerando um E.I.R.P de no máximo de 49,5 dBm. Isso se dá pelo fato dessa frequência não ser licenciada (conceito definido precedentemente no Capítulo 2). Portanto, foi definido como potência transmitida o valor de 25 dBm para um de E.I.R.P de 45.5 dBm.

Os ganhos da antena, assim como as perdas, devido ao cabo e ao conector bem como a potência limiar (sensibilidade do receptor), seguiram os valores sugeridos (apresentados anteriormente nos Capítulos 2 e 5) pela ferramenta SINMCEL. E assim como no diagrama anterior, os modelos de propagação selecionados para a simulação foram o de *Longley Rice* - escolhido como I opção e *Sui* – escolhido como II opção para análise. Logo, a FIGURA 32 apresenta os resultados gerados para esta simulação.

FIGURA 32 – DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO PARA O *LINK* (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz.



FONTE: Ferramenta SINMCEL (2020).

De acordo com a FIGURA 32, notou-se que um sinal transmitido a uma potência de 25 dBm, sofreu uma atenuação provocada pela ação exclusiva do

modelamento do canal, no valor de 124,48 dB para o cenário de análise que considerou o Modelo I - *Longley Rice* (representado pela sigla AT_RC no diagrama); enquanto que para o cenário de análise do Modelo II – *Sui* (representado pela sigla AT_SU no diagrama), essa atenuação foi de 109,73 dB. Ou seja, o resultado que obteve o valor mais favorável em relação atenuação no canal, foi pelo cenário do Modelo II.

Após esta primeira observação, foram somados aos resultados do modelamento do canal, os valores referentes a perda, devido ao cabo e aos conectores que ficaram em torno de 4,8 dB, assim como as perdas, devido à chuva (representado pela sigla PC_RC ou PC_SU no diagrama) e em razão dos gases atmosféricos (representado pela sigla PG_RC ou pela sigla PG_SU no diagrama), nos valores de 1,29 dB e de 0,038 dB respectivamente, para ambos os cenários de análise. Logo, a partir dessas informações sobre as perdas no *link*, obteve-se o valor da atenuação líquida gerada pelo cenário de análise do Modelo II, no valor de 64,26 dB (representado pela sigla ATOTAL_SU no diagrama); enquanto que para cenário do Modelo I, o valor obtido foi de 79,71 dB (representado pela sigla ATOTAL_RC no diagrama).

Em função dos resultados da atenuação líquida e da potência limiar adotada no valor de -88 dBm para um BER de 10^{-4} , obteve-se a potência recebida de -54,01 dBm (representado pela sigla PR_RC no diagrama) para o cenário do Modelo I, e o valor de -39,26 dBm (representado pela sigla PR_SU no diagrama) para o cenário do Modelo II. Nesse ponto da simulação, observou-se que, apesar da resposta do cenário de análise do Modelo II ter sido mais favorável, os níveis de sinal recebido para ambas simulações apresentaram valores aceitáveis.

Por esse motivo, tanto a margem de desvanecimento quanto a margem de desvanecimento por interferências, no cenário do Modelo II, obtiveram como resultados os valores de 48,76 dB (representado pela sigla MD_SU no diagrama) e de 47,78 dB (representado pela sigla MDI_SU no diagrama) respectivamente, que correspondem as características de enlaces ideais para aplicações (serviços) que exigem uma qualidade de desempenho elevada. Em contrapartida, para o cenário do Modelo I, a margem de desvanecimento obtida foi de 33,98 dB (representado pela sigla MD_RC no diagrama) e a margem de desvanecimento por interferência de 32,98 dB (representado pela sigla MDI_RC no diagrama).

Outro ponto pertinente que foi apresentado no diagrama, foram os resultados referentes a determinação da área de assinatura, na qual obteve-se o valor de 0,00027 dB (representado pela sigla AAS no diagrama) e uma margem de desvanecimento dispersivo no valor de 36,06 dB (representado pela sigla MDD no diagrama). Vale ressaltar que ambos os parâmetros são importantes no *link* por auxiliarem na avaliação da qualidade do equipamento, no que se refere a uma possível falha de funcionamento.

Com relação aos resultados relativos ao ruído térmico, considerando tanto o cenário do Modelo I quanto o Modelo II de análise, obteve-se como respostas um ruído térmico para 100% do tempo no valor de -97 dBm (representado pela sigla TR100_RC ou pela sigla TR100_SU no diagrama); enquanto o ruído térmico para 50% do tempo foi de 45,8 dB (representado pela sigla TR50_RC ou pela sigla TR500_SU no diagrama) e para 80% do tempo de 77,6 dB (representado pela sigla TR80_RC ou pela sigla TR80_SU no diagrama).

Diante dessas informações e dando sequência a explicação, a primeira RSR analisada considerou a potência recebida em função do ruído térmico para 100% do tempo, resultando no valor de 52,75 dB (representado pela sigla RSR100_SU no diagrama) para o cenário que considerou o Modelo II de análise. Para o cenário que considerou o Modelo I, a RSR foi de 43 dB (representado pela sigla RSR100_RC no diagrama). Ou seja, nesse caso, o *link* opera em condições consideradas satisfatórias pois para ambos resultados a RSR encontra-se acima de 40 dB para uma possível degradação do sinal.

Já em relação aos ruídos interferentes gerados por outras fontes, como por exemplo, em razão dos tipos de polarização e devido ao eco, apresentaram como resultados da simulação que considerou o cenário de análise do Modelo I, o valor de 1,6969 dB, relativo ao ruído por efeito da polarização paralela (representado pela sigla RIPP_RC no diagrama) e de 1,1710 dB em consequência do ruído de polarização cruzada (representado pela sigla RIPC_RC no diagrama). Enquanto para o cenário do Modelo II, o ruído interferente, devido à polarização paralela e cruzada foram de 1,2333 dB (representado pela sigla RIPP_SU no diagrama) e de 0,7824 dB (representado pela sigla RIPC_SU no diagrama) respectivamente. Quanto ao ruído de eco, este resultou no valor de 6,8776 dB para ambos os cenários de simulação (representado pela sigla RE_RC ou pela sigla RE_SU no diagrama).

A partir dos resultados obtidos em relação aos ruídos pertinentes ao sistema, determinou-se o ruído total do *link*. Logo, a simulação que considerou o cenário de análise do Modelo I apresentou como resultado: um ruído total para 100% do tempo de 106,7 dB (representado pela sigla RT100_RC no diagrama) assim como os valores de 58,25 dB referente ao ruído total para 50% do tempo (representado pela sigla RT50_RC no diagrama) e de 87,36 dB relativo ao ruído total para 80% do tempo (representado pela sigla RT80_RC no diagrama).

Por outro lado, o cenário de análise, que considerou o Modelo II, obteve os resultados mais favoráveis (mesmo com pouca diferença em dB's entre os seus resultados) do que os valores apresentados pelo cenário do Modelo I, onde o ruído total para 100% do tempo ficou em torno de 106 dB (representado pela sigla RT100_SU no diagrama); enquanto os valores do ruído total para 50% e 80% do tempo, ficaram em torno de 57,4 dB (representado pela sigla RT50_SU no diagrama) e de 86,5 dB (representado pela sigla RT80_SU no diagrama), respectivamente.

Entende-se que além dos resultados apresentados para ambos os cenários de análise estarem dentro do limite recomendado ($TR + 25$), comparativamente em relação ao ruído total do *link*. Também foi possível, a realização de uma segunda análise a respeito da RSR que, neste caso, foi avaliada em função da potência recebida e do ruído total para 100% do tempo. Portanto, a RSR obtida para a simulação, no cenário que considerou o Modelo I, foi de 39,65 dB (representado pela sigla RSR100_RC no diagrama). Enquanto que para o cenário de análise do Modelo II, esse valor foi de 47,72 dB (representado pela sigla RSR100_SU no diagrama). Em vista disso, apesar da RSR do cenário, que considerou o Modelo II apresentar a melhor resposta, percebeu-se também, que para ambos cenários de simulação houve uma queda no valor da RSR, quando comparou-se ao valor obtido na primeira análise, a qual considerou apenas o ruído térmico como principal ponto agravante de degradação no sinal.

Já de acordo com o processo de análise da confiabilidade de um sistema de transmissão, foram considerados para tal: análises referentes a inoperância devido ao desvanecimento seletivo e não seletivo, estimativa da probabilidade do período de inoperância em minutos por ano, porcentagem do tempo em operação bem como a confiabilidade final do *link*. Nesse sentido, os resultados obtidos para a simulação que considerou o cenário de análise do Modelo II, apresentaram as seguintes respostas:

para a probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento não seletivo e seletivo os valores de $1,916 \times 10^{-10} \%$ (representado pela sigla PIDNS_SU no diagrama) e de $3,328 \times 10^{-10} \%$ (representado pela sigla PIDS_SU no diagrama) respectivamente. Enquanto que em relação a probabilidade do período de inoperância total em minutos por ano, o valor encontrado foi de 2,496 m/A (representado pela sigla PITMA_SU no diagrama). Em seguida, após estas observações, foi possível determinar a porcentagem de tempo de operação do *link* em 99,9999987% (representado pela sigla PTO_SU no diagrama), assim como a confiabilidade no valor de 99,999331% (representado pela sigla CONF_SU no diagrama).

Por outro lado, a probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento não seletivo, considerando o cenário de análise o Modelo I, foi o valor de $5,722 \times 10^{-10} \%$ (representado pela sigla PIDNS_RC no diagrama) e para o desvanecimento seletivo o valor obtido foi o mesmo apresentado pelo cenário do Modelo I, no valor de $3,328 \times 10^{-10} \%$ (representado pela sigla PIDS_RC no diagrama). Enquanto que para a probabilidade do período de inoperância total em minutos por ano, o valor obtido foi de 5,756 m/A (representado pela sigla PITMA_RC no diagrama). E por fim, a porcentagem de tempo de operação encontrada foi de 99,9999942% (representado pela sigla PTO_RC no diagrama) para uma confiabilidade no valor de 99,9800% (representado pela sigla CONF_RC no diagrama) do sistema.

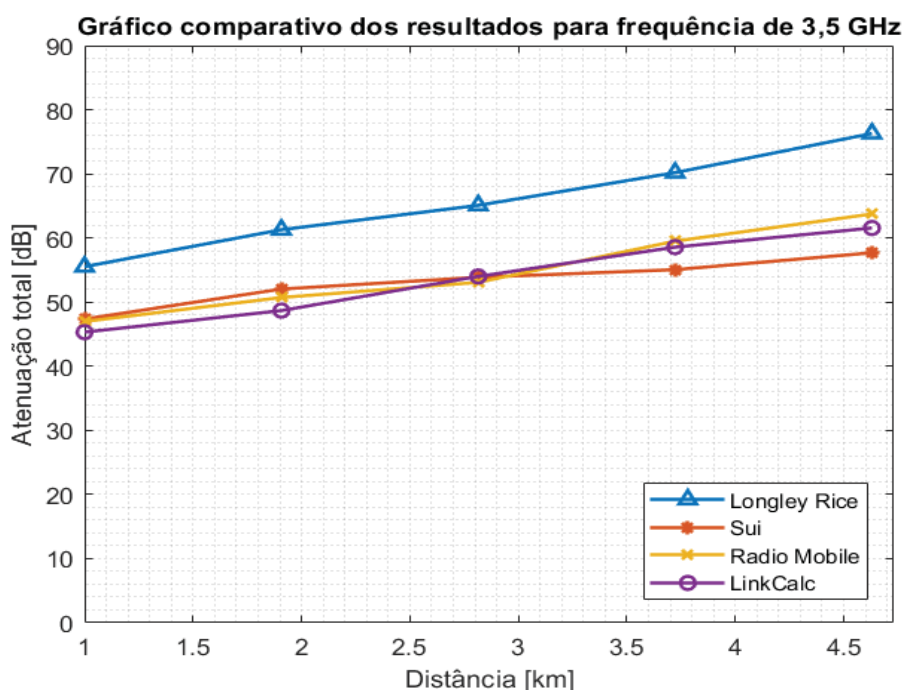
Tendo em vista as análises que foram discutidas neste tópico, foi possível concluir que o *link* (UT_CP), na frequência de 5,8 GHz, apresentou como resultados uma taxa de confiabilidade acima do valor recomendado (equipamentos utilizam comumente como referência o valor acima de 98% para sistema de médio e alto desempenho) como mostrou o Diagrama de Nivelamento Estático; simulado tanto para o cenário de análise do Modelo I quanto para o Modelo II.

7.3.2 Análise Comparativa dos Resultados do *Link* (UT_CP) em relação a outros *Softwares*

Este tópico tem o objetivo de comparar os valores obtidos pelos os Diagramas de Nivelamento (fornecidos pela ferramenta SINMCEL) em relação aos resultados gerados pelos *softwares* de livre acesso, *Radio Mobile* e *LinkCalc*. Devido às limitações das ferramentas *open source* (*Radio Mobile* e *LinkCalc*), no que diz respeito

a quantidade de dados disponíveis para análise, realizou-se comparações relativas a atenuação líquida no *link* bem como a potência recebida para as frequências de 3,5 GHz e 5,8 GHz. Logo, a FIGURA 33 mostra a atenuação líquida do *link* para 3,5 GHz.

FIGURA 33 – RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O *LINK* (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.



FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

De acordo com a FIGURA 33, o resultado referente a atenuação total do *link* para o cenário de análise do Modelo *Longley Rice* foi de 76,29 dB (representado no gráfico pela linha azul). Enquanto que para o cenário do Modelo *Sui* o valor ficou em torno de 58 dB (representado no gráfico pela linha laranja).

Vale ressaltar, que estes resultados foram apresentados e discutidos exhaustivamente nos tópicos 7.5 e 7.5.1 deste capítulo.

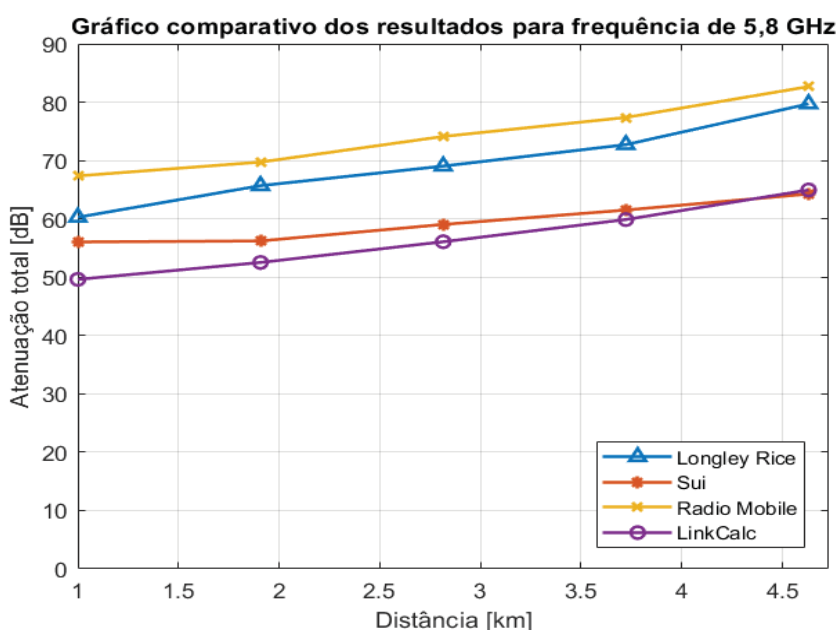
Isso posto, o resultado da simulação para atenuação líquida do enlace (UT_CP) obtido pelo *software Radio Mobile* foi de 63,74 dB (representado no gráfico pela linha amarela) e, para a ferramenta *LinkCalc*, o valor ficou em torno de 62 dB (representado no gráfico pela linha roxa). Diante desses resultados, percebeu-se que existe uma diferença entre os valores obtidos pelos *softwares* gratuitos em relação aos resultados que foram apresentados pela ferramenta SINMCEL.

Uma possível explicação para esse fato, se dá pelo motivo das ferramentas de livre acesso apresentarem como principal desvantagem, uma ausência de

detalhamento clara sobre todos parâmetros que fazem parte do processo de concepção do *link*. No entanto, sabe-se que estão presentes de forma inerente no sistema e aparecem de forma embutida nos resultados gerados pelas simulações.

Logo, para fins comparativos a FIGURA 34 apresenta o resultado da atenuação líquida considerando a frequência de 5,8 GHz.

FIGURA 34 – RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O *LINK* (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz.

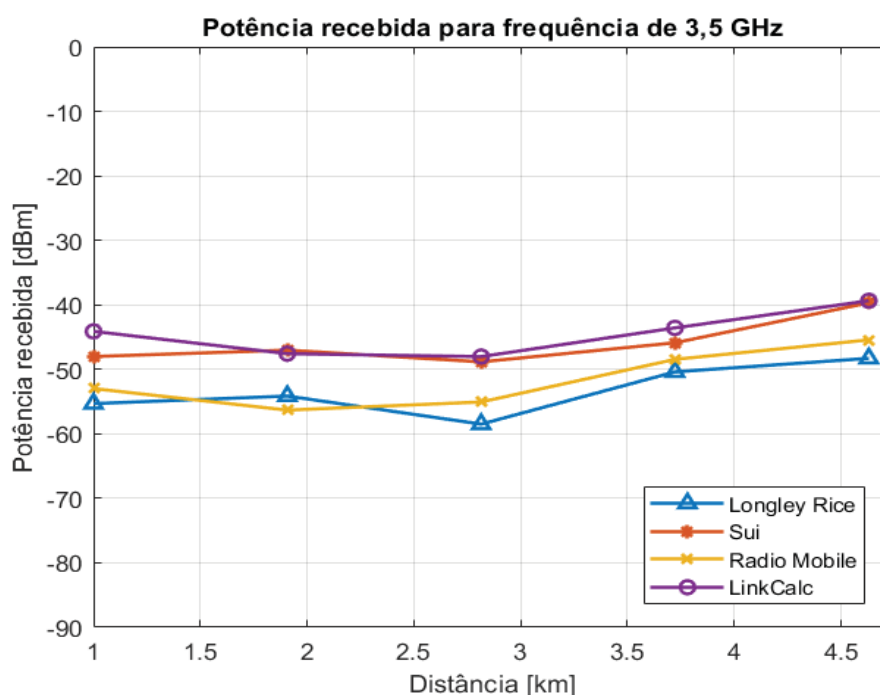


FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

Conforme a FIGURA 34, o pior resultado obtido para a atenuação líquida foi apresentado pelo *software Radio Mobile* no valor em torno de 83 dB (representado no gráfico pela linha amarela), enquanto que para a ferramenta *LinkCalc* este valor foi de 65 dB (representado no gráfico pela linha roxa). Para o cenário de análise do Modelo I (representado no gráfico pela linha azul) e do Modelo II (representado no gráfico pela linha laranja) os valores obtidos foram de 79,71 dB e 64,26 dB respectivamente. Diante disso, notou-se que para esta frequência os resultados obtidos foram relativamente próximos em seus valores, para as simulações realizadas pelo *software LinkCalc* e pela ferramenta SINMCEL no caso do cenário de análise que considerou o Modelo *Sui*.

Do exposto, a FIGURA 35 mostra os resultados referentes à potência recebida considerando a frequência de 3,5 GHz.

FIGURA 35 – RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O *LINK* (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.

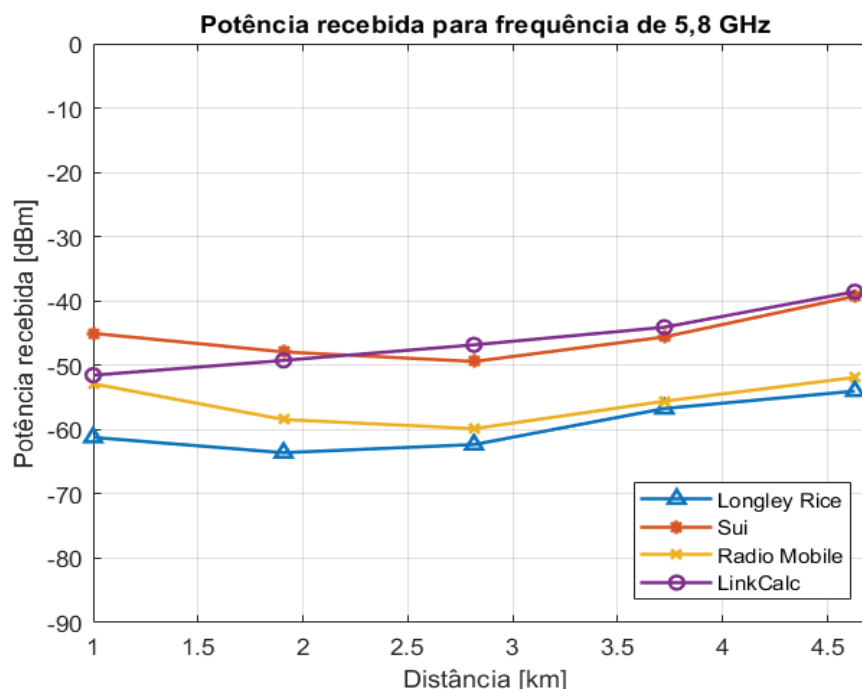


FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

A FIGURA 35, apresentou o resultado referente à potência recebida no valor de $-48,29$ dBm para a simulação que considerou o cenário de análise do Modelo *Longley Rice* (representado no gráfico pela linha azul). Assim como o valor de $-39,69$ dBm para o cenário do Modelo *Sui* (representado no gráfico pela linha laranja); enquanto que para os *softwares* de predição *Radio Mobile* e *LinkCalc*, os valores obtidos da potência recebida foram de $-45,43$ dBm (representado no gráfico pela linha amarela) e de $-39,36$ dBm (representado no gráfico pela linha roxa) respectivamente. Esses resultados foram simulados a partir de uma potência transmitida de 28 dBm para uma sensibilidade limiar de -89 dBm. Diante disso, percebeu-se que apesar da diferença entre os valores obtidos pelo SINMCEL e pelas ferramentas gratuitas serem relativamente pequenas entre eles, a simulação, que apresentou o pior resultado para a potência recebida, foi o cenário de do Modelo do *Longley Rice* (ferramenta SINMCEL).

Logo, a FIGURA 36 apresenta os resultados da potência recebida considerando a frequência de operação de 5,8 GHz.

FIGURA 36 – RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O LINK (UT_CP) PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz.



FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

De acordo com a FIGURA 36, a potência recebida em torno de $-52,88$ dBm foi obtida pela simulação do *Radio Mobile* (representado no gráfico pela linha amarela) enquanto o valor $-38,55$ dBm representou o resultado gerado pela ferramenta *LinkCalc* (representado no gráfico pela linha roxa). Já com relação aos resultados fornecidos pelo Diagrama de Nivelamento, obteve-se o valores de $-54,01$ dBm referente ao cenário de análise do Modelo I (representado no gráfico pela linha azul) e $-39,26$ dBm para o cenário do Modelo II (representado no gráfico pela linha laranja).

Isso posto, notou-se que os valores obtidos pelo *LinkCalc* e pelo SINMCEL na simulação que considerou o cenário do Modelo II, apresentaram resultados muito semelhantes, assim como ocorreu também com os valores relacionados ao *Radio Mobile* e SINMCEL para o cenário de análise do Modelo I.

E por fim, segue de forma sumarizada na TABELA 20 todos os parâmetros disponíveis para análise, que o *software* SINMCEL bem como as ferramentas de livre acesso, oferecem em suas respectivas plataformas.

TABELA 20 –COMPARAÇÃO ENTRE OS SOFTWARES

<i>Software SINMCEL</i>	<i>Software Radio Mobile</i>	<i>Software LinkCalc</i>
Parâmetros de Geometria	Parâmetros de Geometria	Parâmetros de Geometria
Modelo de Propagação (I) Modelo de Propagação (II) simultaneamente	Modelo de Propagação (I)	Modelo de Propagação (I)
Atenuação em Razão do Modelamento do Canal	Atenuação em Razão do Modelamento do Canal	Atenuação em Razão do Modelamento do Canal
Perda devido ao Cabo	Perda devido ao Cabo	Perda devido ao Cabo
Perda devido ao Conector	Perda devido ao Conector	-----
Perda devido à Chuva	-----	Perda devido à Chuva
Perda em razão dos Gases Atmosféricos	-----	-----
Atenuação Total	Atenuação Total	Atenuação Total
Área de Assinatura	-----	-----
Margem de Desvanecimento Dispersivo	-----	-----
Potência Recebida	Potência Recebida	Potência Recebida
Margem de Desvanecimento	Margem de Desvanecimento	Margem de Desvanecimento
Margem de Desvanecimento em razão de Interferência	-----	-----
Ruído Térmico para 100% do Tempo	-----	-----
Ruído Térmico para 80% do Tempo	-----	-----
Ruído Térmico para 50% do Tempo	-----	-----
RSR (1)	-----	-----
Ruído devido a Polarização Paralela	-----	-----
Ruído devido a Polarização Cruzada	-----	-----
Ruído de Eco	-----	-----
Ruído Total para 100% do Tempo	-----	-----
Ruído Total para 80% do Tempo	-----	-----
Ruído Total para 500% do Tempo	-----	-----
RSR (2)	-----	-----
Inoperância em razão do Desvanecimento Seletivo	-----	-----
Inoperância em razão do Desvanecimento não Seletivo	-----	-----
Probabilidade de Inoperância Total em Minutos por Ano	-----	-----
Porcentagem de Tempo de Operação	-----	-----
Confiabilidade	-----	Confiabilidade

FONTE: A Autora (2020).

Por motivo de organização do documento, uma vez tendo explicado detalhadamente todo o processo de análise dos resultados que foram apresentados pelo Diagrama de Nivelamento Dinâmico e Estático, para o *link* (UT_CP) nas

frequências de 3,5 GHz e 5,8 GHz, não há necessidade de replicar os pontos que foram discutidos exaustivamente nos tópicos anteriores desse capítulo. Logo, as próximas análises e discussões, que se darão nos demais cenários de simulação, ocorrerão de forma pontual seguindo os critérios e recomendações que foram utilizadas neste enlace em estudo.

7.4 RESULTADOS E ANÁLISES ATRAVÉS DOS DIAGRAMAS DE NIVELAMENTO PARA O *LINK* (UT_SA)

Neste tópico, a simulação realizada foi para o *link* (UT_SA), na frequência de 8,5 GHz, utilizando os modelos de propagação *Sui* e *Ericsson*. Os demais parâmetros de entrada considerados para este cenário são mostrados na FIGURA 37.

FIGURA 37 - PARAMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DO *LINK* (UT_SA)

PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA	POTÊNCIA TRANSMITIDA (dBm)	POTÊNCIA LIMAR (dBm)
FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO (GHz)	26	-91
FAIXA DE FREQUÊNCIA (MHz)	E.I.R.P (dBm)	GANHO DA ANTENA (dBi)
8275 à 8289	49.7	30.8
MODELO DE PROPAGAÇÃO ESCOLHIDO	GANHO DA ANTENA (dBi)	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi)
MODELO I Sui	29.5	vertical e horizontal
MODELO II Ericson	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi)	ALTURA DA ANTENA (m)
	vertical e horizontal	44
	ALTURA DA ANTENA (m)	BER
	35	10 ⁻⁶
	PERDA DEVIDO AO CABO (dB)	PERDA DEVIDO AO CABO (dB)
	5.8	1
	PERDA DEVIDO O CONECTOR (dB)	PERDA NO CONECTOR (dB)
	0.9	0.2

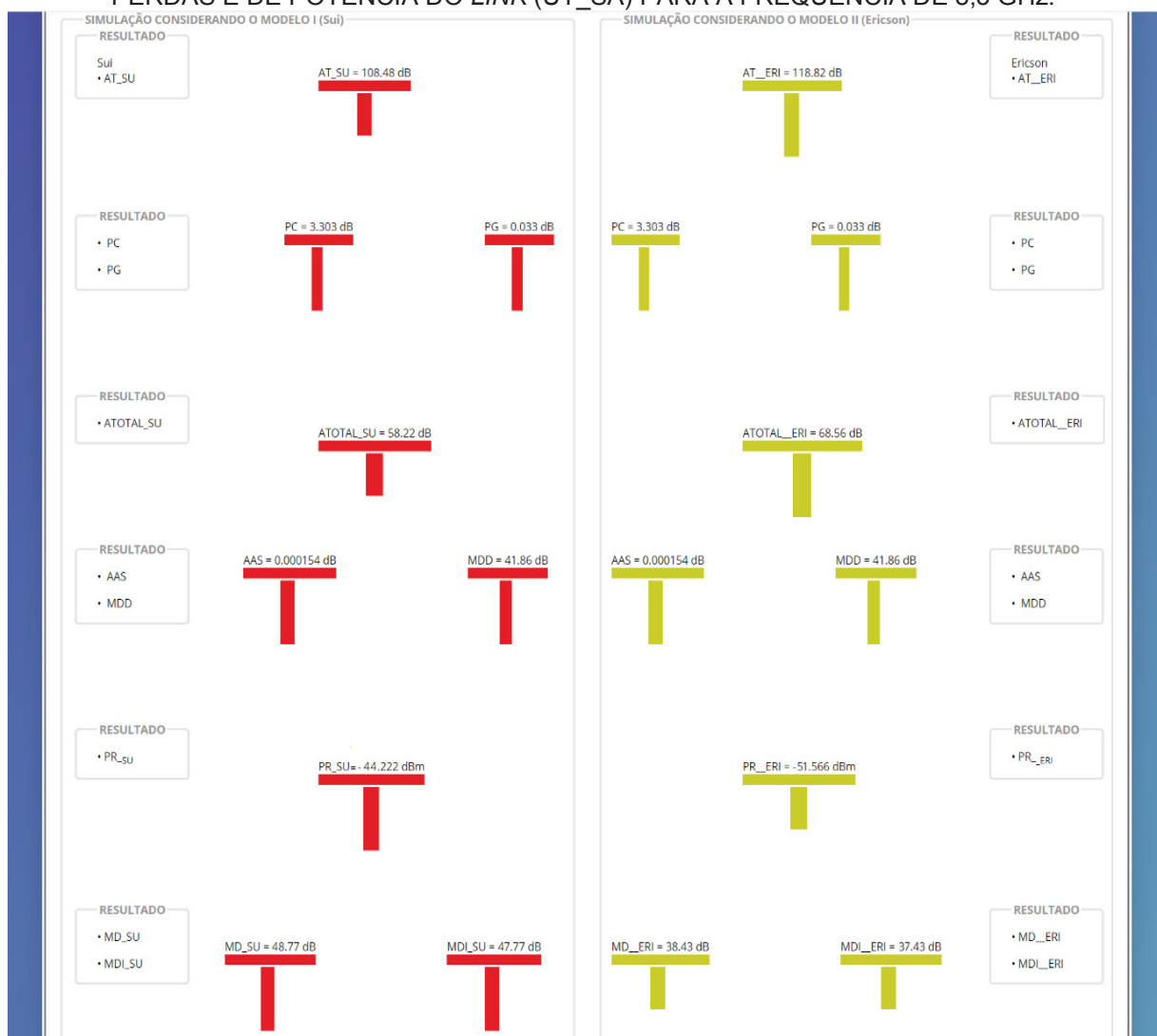
FONTE: Tela capturada do software SINMCEL (2020).

Como parâmetros de entrada, as alturas das antenas mostradas na FIGURA 37, foram determinadas também, a partir da localização geográfica das estações. Dito isso, a altura da antena da estação UT foi definida em 35 metros e da estação SA em 44 metros. Quanto à frequência de operação, utilizou-se a faixa de 8275 MHz a 8289 MHz com uma largura de banda de 14 MHz. Os ganhos de cada antena, bem como

as perdas devido ao cabo e, em razão do conector e a potência limiar, seguiram os valores sugeridos pela ferramenta.

A potência transmitida permitida para a frequência de 8,5 GHz é de 30 dBm no seu valor máximo, considerando um E.I.R.P de 53 dBm. Neste caso, por se tratar de um *link* de curta distância, foi utilizado uma potência 26 dBm para um E.I.R.P de 49,7 dBm. Os modelos de propagação selecionados, para esta simulação, foram do *Sui* - escolhido como opção I e *Ericsson* – escolhido como opção II para análise. Assim como foi feito para o *link* (UT_CP), o Diagrama de Nivelamento Dinâmico será apresentado em três partes. Portanto, a FIGURA 38 mostra apenas os resultados da primeira parte do Diagrama de Nivelamento.

FIGURA 38 - DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE PERDAS E DE POTÊNCIA DO *LINK* (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz.



FONTE: Software SINMCEL (2020).

Conforme os resultados mostrados na FIGURA 38, percebeu-se que os valores relativos à atenuação provocada apenas pela ação do modelamento do canal, obteve seu menor valor pelo Modelo I (representado pela sigla AT_SU no diagrama, na barra 1 de cor vermelha) do que em relação ao Modelo II (representado pela sigla AT_ERI no diagrama, na barra 1 de cor verde). Ou seja, a atenuação calculada para o modelo do *Sui* foi de 108,48 dB; enquanto para o Modelo *Ericsson*, este valor foi de 101,49 dB.

Em relação aos parâmetros referentes a perda devido à chuva (representado pela sigla PC no diagrama, na barra 2) e aos gases atmosféricos (representado pela sigla PG no diagrama, na barra 3), os valores obtidos tanto para a simulação do cenário de análise do Modelo I quanto para o Modelo II foram de 3,303 dB de perda devido à chuva e de 0,033 dB em razão dos gases atmosféricos.

Quanto em relação a atenuação líquida do *link* (UT_SA), observou-se que o resultado mais favorável foi dado pelo cenário do Modelo I, onde o valor calculado foi de 58,22 dB (representado pela sigla ATOTAL_SU na barra 4, na cor vermelha). Por outro lado, o cenário do Modelo II apresentou um valor de atenuação líquida (representado pela sigla ATOTAL_ERI na barra 4, na cor verde) de 68,56 dB, ou seja, caracterizando de fato uma atenuação um pouco maior do que a resposta dada pelo cenário do Modelo I. Uma sugestão que pode ser aplicada com objetivo de melhorar a atenuação neste cenário, seria a utilização de uma potência maior na transmissão ou até mesmo antenas com ganhos maiores.

Outro ponto de observação pertinente, está relacionado a área de assinatura (representado pela sigla AAS no diagrama, na barra 5) e a margem de desvanecimento dispersivo (representado pela sigla MDD no diagrama, na barra 6), que apresentaram seus valores tanto para a simulação considerando o Modelo I bem como o Modelo II de 0,000154 dB e de 41,86 dB respectivamente. Isto posto, estes resultados se encontram dentro do esperado segundo as referências técnicas do ETSI e do ITU-R F.1093 (AAS – não deve exceder o valor padrão de 0,573 dB assim como o MDD – tolerável em até 51 dB para as frequências de 3 GHz a 15 GHz).

Já com relação aos parâmetros de potência observou-se que, os resultados referentes a potência recebida, margem de desvanecimento e a margem de desvanecimento por interferências obtidos na simulação que considerou o cenário do Modelo I para análise, apresentaram valores mais favoráveis do que os fornecidos

pelo cenário do Modelo II. Assim sendo, enquanto a simulação que considerou o cenário do Modelo I para análise, resultou em uma potência recebida de $-44,22$ dBm (representado pela sigla PR_SU no diagrama, na barra 7 de cor vermelha), assim como uma margem de desvanecimento de $48,77$ dB (representado pela sigla MD_SU no diagrama, na barra 8 de cor vermelha) e uma margem de desvanecimento por interferências de $47,77$ dB (representado pela sigla MDI_SU no diagrama, na barra 9 de cor vermelha). O Modelo II apresentou como resultados: uma potência recebida inferior no valor de $-51,56$ dBm (representado pela sigla PR_ERI no diagrama, na barra 7 de cor verde), uma margem de desvanecimento de $38,43$ dB (representado pela sigla MD_ERI no diagrama, na barra 8 de cor verde) e uma margem de desvanecimento por interferências de $37,43$ dB (representado pela sigla MDI_ERI no diagrama, na barra 9 de cor verde).

De acordo com isso, esses resultados demonstraram que, apesar de haver diferenças nos valores obtidos entre os cenários de análise, o saldo final ainda foi positivo, considerando que a potência transmitida neste *link* poderia atingir até 30 dBm, o que poderia acarretar, em resultados ainda melhores, no que diz respeito a potência recebida e as suas respectivas margens de segurança (MD e MDI). Vale ressaltar, que a potência limiar utilizada foi de -91 dBm para um BER de 10^{-6} (critérios detalhados e discutidos no Capítulo 2).

Após estas análises, serão apresentados os parâmetros relativos aos ruídos do *link* (UT_SA) como mostra a FIGURA 39.

FIGURA 39 – DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE RUÍDO DO *LINK* (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz.



FONTE: *Software SINMCEL* (2020).

A FIGURA 39 mostra que os valores obtidos na simulação, considerando o cenário do Modelo I, assim como o Modelo II, resultaram em um nível de ruído térmico de $-99,5$ dBm para a atuação em 100% do tempo (representado pela sigla TR100%_SU ou pela sigla TR100%_ERI no diagrama, na barra 10); enquanto que para o ruído térmico para 80% do tempo o valor foi de $79,6$ dB (representado pela sigla TR80%_SU ou pela sigla TR80%_ERI no diagrama, na barra 12) e para 50% do tempo de $49,7$ dB (representado pela sigla TR50%_SU ou pela sigla TR50%_ERI no diagrama, barra 11).

Quanto a RSR em sua primeira análise, a simulação que considerou o cenário do Modelo I, obteve uma RSR de $49,31$ dB (representado pela sigla RSR100%_SU no diagrama, na barra 13 de cor vermelha) enquanto para o cenário do Modelo II, a RSR foi de $41,97$ dB (representado pela sigla RSR100%_ERI no diagrama, na barra 13 de cor verde). Logo, o resultado obtido pelo cenário do Modelo I obteve uma RSR melhor do que o apresentado pelo Modelo II.

Dando sequência à análise, os resultados obtidos para os ruídos interferentes devido aos tipos de polarização, mostrados no Diagrama de Nivelamento, apresentaram para a simulação que considerou o cenário do Modelo I, o valor de $0,9110$ dB de ruído interferente por polarização paralela (representado pela sigla RIPP100%_SU no diagrama, na barra 14 de cor vermelha) e de $0,5452$ dB de ruído interferente por polarização cruzada (representado pela sigla RIPC100%_SU no diagrama, na barra 15 de cor vermelha). Enquanto, para o cenário do Modelo II, os valores obtidos foram de $1,3660$ dB de ruído interferente por polarização paralela (representado pela sigla RIPP100%_ERI no diagrama, na barra 14 de cor verde) e de $0,8842$ dB de ruído interferente por polarização cruzada (representado pela sigla RIPC100%_ERI no diagrama, na barra 15 de cor verde). Mediante a esses valores, percebeu-se que apesar de haver um pequeno aumento na atuação desses ruídos neste *link*, em relação ao resultado obtido pelo enlace anterior, os valores encontrados, para ambos cenários de simulação, foram os menores possíveis não passando de $2,3$ dB para o pior caso.

Já com relação ao ruído em razão do Eco, o resultado encontrado na simulação tanto para o Modelo I quanto para o Modelo II foi o valor de $6,2417$ dB (representado pela sigla RE_SU no diagrama, na barra 16 de cor vermelha ou pela sigla RE_ERI no diagrama, na barra 16 de cor verde).

Tendo por base as informações anteriores, o próximo parâmetro a ser analisado será o ruído total. Logo, a simulação que considerou o cenário do Modelo I apresentou o melhor resultado em comparação a resposta dada pelo cenário do Modelo II. Portanto, o valor do ruído total para 100% do tempo foi de 107,2 dB (representado pela sigla RT100%_SU no diagrama, na barra 17 de cor vermelha); enquanto para o ruído total considerando 80% e 50% do tempo, os valores obtidos foram de 87,32 dB (representado pela sigla RT80%_SU no diagrama, na barra 19 de cor vermelha) e 57,46 dB (representado pela sigla RT50%_SU no diagrama, na barra 18 de cor vermelho) respectivamente.

Já os resultados referentes a simulação que considerou o cenário no Modelo II resultou em um ruído total para 100% do tempo no valor de 108 dB (representado pela sigla RT100%_ERI no diagrama, na barra 17 de cor verde); enquanto o ruído total para 80% do tempo o valor foi de 88,12 dB (representado pela sigla RT80%_ERI no diagrama, na barra 19 de cor verde) e para 50% do tempo de 58,26 dB (representado pela sigla RT50%_ERI no diagrama, na barra 18 de cor verde). De acordo com a recomendação do ITU, os ruídos produzidos por outras fontes atingiram o patamar de 7 dB a 8 dB no máximo, ou seja, não excederam o limite recomendado.

E por fim, para fechar esta segunda parte do diagrama de nivelamento, foi necessário realizar uma análise a respeito da RSR novamente, quando se considerou a atuação de todos os ruídos do *link* e não mais a contribuição do ruído térmico apenas. Do exposto, de acordo com os resultados encontrados, percebeu-se que a simulação baseada no cenário do Modelo I, apresentou a melhor resposta da RSR. Logo, o valor obtido para cenário do Modelo I foi de 42,01 dB (representado pela sigla RSR_SU no diagrama, na barra 20 de cor vermelha) enquanto a RSR para o cenário do Modelo II, foi de 37,46 dB (representado pela sigla RSR_ERI no diagrama, na barra 20 de cor verde).

A partir desses resultados, notou-se que, apesar da segunda análise da RSR apresentar uma diminuição considerável em relação ao seu valor inicial, ainda assim, os valores obtidos se encontram dentro do esperado (média probabilidade de degradação do sinal no *link*). Após as análises feitas sobre a segunda parte do diagrama, restam apenas os parâmetros relativos a confiabilidade que são apresentados na FIGURA 40.

FIGURA 40 - DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE DO *LINK* (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz.



FONTE: Software SINMCEL (2020).

De acordo com os parâmetros mostrados na FIGURA 40, obteve-se como resultado de simulação para a probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento não seletivo, considerando o cenário do Modelo I, o valor de $1,8990 \times 10^{-09} \%$ (representado pela sigla PINDS_SU no diagrama, na barra 21 de cor vermelha); enquanto a simulação que considerou o cenário do Modelo II o valor foi de $2,0555 \times 10^{-08} \%$ (representado pela sigla PINDS_ERI no diagrama, na barra 21 de cor verde). Já para o parâmetro da probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento seletivo, calculado tanto para a simulação do Modelo I quanto para o Modelo II, resultou no valor de $1,7758 \times 10^{-09} \%$ (representado pela sigla PIDS_SU no diagrama, na barra 22 de cor vermelha ou pela sigla PIDS_ERI no diagrama, na barra 22 de cor verde). Vale ressaltar, que apesar de ambos cenários de simulação apresentarem diferenças entre seus resultados, ainda permanecem com os seus valores dentro dos limites recomendados.

Dada essa informação, a probabilidade do período de inoperância total em minutos por ano – PITMA obtida para a simulação que considerou o cenário do Modelo I, foi o valor de 2,0733 m/A (representado pela sigla PITMA_SU no diagrama, na barra 23 de cor vermelha). Enquanto, para o cenário do Modelo II, o valor foi de 2,0766 m/A (representado pela sigla PITMA_ERI no diagrama, na barra 23 de cor verde), ou seja, o resultado conseguido pela simulação do cenário do Modelo I atingiu o valor mais favorável (mesmo em pouca diferença) do que o alcançado pelo cenário do Modelo II.

Outro parâmetro pertinente, é a porcentagem de tempo de operação, que resultou no valor de 99,9998976% para cenário de análise do Modelo I (representado pela sigla PTO_SU no diagrama, na barra 24 de cor vermelha) e de 99,9997658% para o cenário do Modelo II (representado pela sigla PTO_ERI no diagrama, na barra 24 de cor verde). Logo, entende-se que a porcentagem de tempo de operação foi maior no cenário que considerou o Modelo I.

E finalmente, a simulação que obteve a maior confiabilidade do *link* no valor de 99,997333% (representado pela sigla CONF_SU no diagrama, na barra 25 de cor vermelha), corresponde ao cenário de análise do Modelo I; enquanto que para o cenário que considerou o Modelo II, a confiabilidade encontrada foi de 99,995282% (representado pela sigla CONF_ERI no diagrama, na barra 25 de cor verde).

Levando em consideração todas as análises realizadas neste tópico, percebeu-se que através do Diagrama de Nivelamento Dinâmico foi possível analisar detalhadamente o *link* (UT_SA). Logo, pode-se concluir que a simulação do cenário de análise do modelo de propagação *Sui*, apresentou os resultados mais otimistas em relação a confiabilidade e desempenho do sistema.

7.4.1 Análise através do Diagrama de Nivelamento Estático (para o *link* UT_SA)

A FIGURA 41 apresenta os parâmetros de entrada do *software* SINMCEL que foram utilizados para a simulação do *link* (UT_SA), para a frequência de operação de 5 GHz.

FIGURA 41 - PARAMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DO *LINK* (UT_SA) CONSIDERANDO O DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO.

PARAMETROS DE FREQUENCIA	CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO Tx	CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO Rx
FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO (GHz) 5,0	POTÊNCIA TRANSMITIDA (dBm) 27	POTÊNCIA LIMIAR (dBm) -90
FAIXA DE FREQUÊNCIA (MHz) 4400 à 4440	E.I.R.P (dBm) 48,1	GANHO DA ANTENA (dBi) 29,0
MODELO DE PROPAGAÇÃO ESCOLHIDO	GANHO DA ANTENA (dBi) 28,0	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi) horizontal
MODELO I Sui	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi) horizontal	ALTURA DA ANTENA (m) 44
MODELO II Ericsson	ALTURA DA ANTENA (m) 35	BER 10^{-4}
	PERDA DEVIDO AO CABO (dB) 4,9	PERDA DEVIDO AO CABO (dB) 1
	PERDA DEVIDO O CONECTOR (dB) 0,5	PERDA NO CONECTOR (dB) 0,2

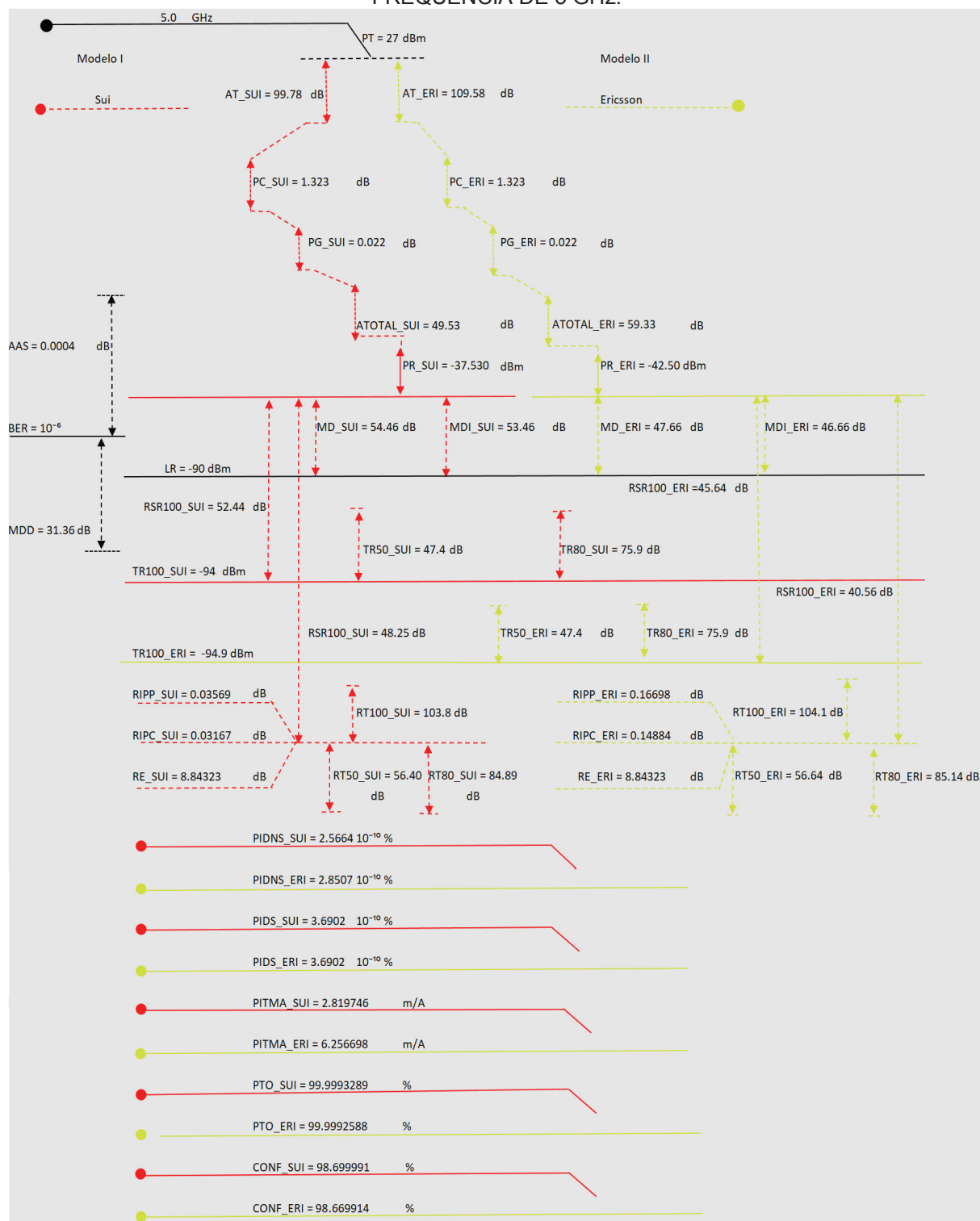
FONTE: Software SINMCEL (2020).

Conforme observado na FIGURA 41, a faixa de frequência de operação escolhida foi de 4400 MHz a 4440 MHz com uma largura de banda de 40 MHz. Por se tratar do mesmo *link* analisado no tópico 7.1, no que se refere a localização geográfica das estações, foram assumidas as mesmas alturas das antenas da simulação anterior.

A potência transmitida para a frequência de 5 GHz é limitada em 33 dBm (que representa 2 W de potência) considerando um E.I.R.P de no máximo 57 dBm. Logo, foi definida a potência transmitida no valor de 27 dBm para um de E.I.R.P de 48,1 dBm. Com relação aos ganhos da antena, perdas devido ao cabo e ao conector bem como a potência limiar, também seguiram os valores sugeridos pela ferramenta.

E assim como no diagrama anterior, os modelos de propagação selecionados para a simulação foram o do *Sui* e do *Ericsson*, escolhidos como I e II opção para análise respectivamente. Logo, a FIGURA 42 apresenta os resultados gerados para esses cenários de simulação.

FIGURA 42 - DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTATICO PARA O LINK (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.



FONTE: Ferramenta SINMCEL (2020).

De acordo com a FIGURA 42, entende-se que a partir de um sinal transmitido a uma potência de 27 dBm, sofre uma atenuação no canal no valor de 99,78 dB, que corresponde ao cenário de análise do Modelo I - *Sui* (representado pela sigla AT SU

no diagrama); enquanto para o cenário de análise do Modelo II – Ericsson (representado pela sigla AT_ERI no diagrama), está atenuação foi de 109,58 dB.

Após determinar a atenuação devido às características de cada modelo de propagação, somaram-se a esses resultados, os valores referentes às perdas devido ao cabo e conectores que ficaram em torno de 5,4 dB, bem como as perdas em razão da chuva (representado pela sigla PC_SU ou pela sigla PC_ERI no diagrama) e dos gases atmosféricos (representado pela sigla PG_SU no diagrama ou pela sigla PG_ERI), cujos valores foram de 1,32 dB e de 0,022 dB respectivamente, para ambos os cenários de análise. Diante disso, o cenário de análise do Modelo I apresentou a menor atenuação líquida do *link*, no valor de 49,53 dB (representado pela sigla ATOTAL_SU no diagrama) enquanto que para cenário do Modelo II o valor obtido foi de 59,33 dB (representado pela sigla ATOTAL_ERI no diagrama).

Portanto, a partir dos resultados de atenuação total, obteve-se uma potência recebida no valor de -37,53 dBm (representado pela sigla PR_SU no diagrama), para o cenário do Modelo I, e de -42,50 dBm (representado pela sigla PR_ERI no diagrama), relativo a resposta dada pelo o cenário do Modelo II. Nessa fase da simulação, observou-se, que apesar do resultado do cenário de análise do Modelo I ter sido mais favorável do que o cenário do Modelo II, os níveis de sinal recebidos para ambas as simulações apresentaram valores aceitáveis, considerando que a potência transmitida foi menor do que 30 dBm (limite máximo permitido para esta frequência).

Logo, de acordo com esta informação, entende-se o porquê da margem de desvanecimento assim como a margem de desvanecimento por interferências simuladas para o cenário do Modelo I, apresentarem resultados nos valores de 54,46 dB (representado pela sigla MD_SU no diagrama) e de 53,46 dB (representado pela sigla MDI_SU no diagrama) respectivamente, que correspondem às características de enlaces, de margens de segurança de nível elevado (baixa probabilidade de ocorrer degradação no *link*) para serviços que exigem alto desempenho. Em compensação, para o cenário de análise do Modelo II, a margem de desvanecimento obtida foi de 47,66 dB (representado pela sigla MD_ERI no diagrama) e a margem de desvanecimento por interferência de 46,66 dB (representado pela sigla MDI_ERI no diagrama).

Apesar dos resultados do cenário de análise do Modelo II, terem sido menores do que os apresentados pelo cenário do Modelo I, os valores obtidos para este cenário são aceitáveis pelo fato de também representarem características de aplicações de alto desempenho.

Outro ponto pertinente a ser analisado, foram os resultados referentes a determinação da área de assinatura, na qual obteve-se o valor de 0,00042 dB (representado pela sigla AAS no diagrama) e da margem de desvanecimento dispersivo em torno de 31,36 dB (representado pela sigla MDD no diagrama).

Quanto aos resultados relacionados ao ruído térmico considerando tanto o cenário do Modelo I quanto do modelo II de análise, obteve-se para a atuação em 100% do tempo o valor de -94,9 dBm (representado pela sigla TR100_SU ou pela sigla TR100_ERI no diagrama); enquanto que para 50% do tempo, este valor foi de 47,4 dB (representado pela sigla TR50_SU ou pela sigla TR50_ERI no diagrama) e para 80% do tempo, de 75,9 dB (representado pela sigla TR80_SU ou pela sigla TR80_ERI no diagrama).

Tendo por base esta informação e dando sequência na explicação, a RSR analisada resultou no valor de 52,44 dB (representado pela sigla RSR100_SU no diagrama) para o cenário que considerou o Modelo I de análise, enquanto para o cenário que considerou o Modelo II, a RSR foi no valor de 45,64 dB (representado pela sigla RSR100_ERI no diagrama). Ou seja, o *link* opera com uma RSR considerada satisfatória para ambos os cenários de simulação, pois os seus valores se encontram acima de 40 dB.

Com relação aos ruídos interferentes gerados por outras fontes, obteve-se como resultados da simulação que considerou o cenário de análise do Modelo I, os valores de 0,0356 dB pertinentes ao ruído por efeito da polarização paralela (representado pela sigla RIPP_SU no diagrama) e de 0,03167 dB em virtude do ruído de polarização cruzada (representado pela sigla RIPC_SU no diagrama). Enquanto, para o cenário do Modelo II, o ruído interferente devido a polarização paralela e cruzada assumiram os valores de 0,1669 dB (representado pela sigla RIPP_ERI no diagrama) e de 0,1488 dB (representado pela sigla RIPC_ERI no diagrama) respectivamente.

Já para o ruído de eco, o valor calculado pela simulação que considerou tanto o cenário de análise do Modelo I quanto do Modelo II, o valor de 8,8432 dB (representado pela sigla RE_SU ou pela sigla RE_ERI no diagrama).

Do exposto, diante dos resultados obtidos em relação aos ruídos pertinentes ao sistema, determinou-se o ruído total do *link*. Logo, a simulação que considerou o cenário de análise do Modelo I apresentou como resultado, um ruído total para 100% do tempo de 103,8 dB (representado pela sigla RT100_SU no diagrama), assim como os valores de 55,40 dB em relação ao ruído total para 50% do tempo (representado pela sigla RT50_SU no diagrama) e de 84,89 dB de ruído total para 80% do tempo (representado pela sigla RT80_SU no diagrama).

Por outro lado, o cenário de análise que considerou o Modelo II, obteve resultados um pouco menos favoráveis, onde o ruído total para 100% do tempo ficou em torno de 104,1 dB (representado pela sigla RT100_ERI no diagrama) e o ruído total para 50% e 80% do tempo de 56,64 dB (representado pela sigla RT50_ERI no diagrama) e de 85,14 dB (representado pela sigla RT80_ERI no diagrama), respectivamente. Diante dessas informações, percebeu-se que os resultados obtidos para ambos os cenários de análise estão dentro do limite recomendado em relação ao ruído total do *link*.

Portanto, a partir da determinação do ruído total, foi realizada a segunda análise relativa a RSR. Logo, para a simulação do cenário que considerou o Modelo I, a RSR obtida foi de 48,25 dB (representado pela sigla RSR100_SU no diagrama) enquanto para o cenário de análise do Modelo II, a RSR encontrada foi de 40,56 dB (representado pela sigla RSR100_ERI no diagrama). Em vista disto, a RSR do cenário que considerou o Modelo I obteve o melhor resultado do que o cenário do Modelo II.

E por fim, para o processo de análise da confiabilidade foram determinadas a inoperância devido ao desvanecimento seletivo e não seletivo, a probabilidade do período de inoperância em minutos por ano, a porcentagem do tempo em operação e a confiabilidade final do *link*. Portanto, os resultados obtidos para a simulação que considerou o cenário de análise do Modelo I apresentaram as seguintes respostas: para a probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento não seletivo e seletivo os valores foram de $2,566 \times 10^{-10} \%$ (representado pela sigla PIDNS_SU no diagrama) e de $3,690 \times 10^{-10} \%$ (representado pela sigla PIDS_SU no diagrama) respectivamente. Já para a probabilidade do período de inoperância total em minutos

por ano, foi de 2,819 m/A (representado pela sigla PITMA_SU no diagrama). Logo, de acordo com estas informações, foi possível determinar a porcentagem de tempo de operação do *link* no valor de 99,9993289% (representado pela sigla PTO_SU no diagrama), bem como a confiabilidade final no valor de 98,699991% (representado pela sigla CONF_SU no diagrama).

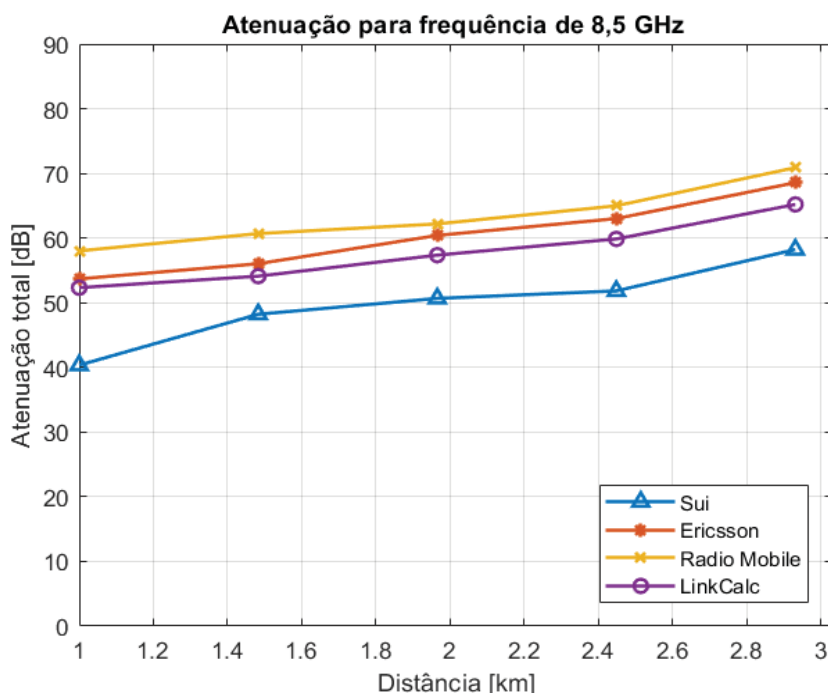
Em contrapartida, a probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento não seletivo, considerando o cenário de análise o Modelo II foi de $2,850 \times 10^{-10} \%$ (representado pela sigla PIDNS_ERI no diagrama) e para o desvanecimento seletivo, no mesmo valor obtido no cenário do Modelo I de $3,690 \times 10^{-10} \%$ (representado pela sigla PIDS_ERI no diagrama). Isto posto, a partir desses resultados, determinou-se a probabilidade do período de inoperância total em minutos por ano, no valor de 6,256 m/A (representado pela sigla PITMA_ERI no diagrama).

E para finalização do processo, os resultados da porcentagem de tempo de operação e da confiabilidade obtidas para este cenário, foram de 99,9992588% (representado pela sigla PTO_ERI no diagrama) e de 98,669914% (representado pela sigla CONF_ERI no diagrama), respectivamente. Logo, tendo em vista as análises realizadas, foi possível concluir que o *link* (UT_SA) na frequência de 5 GHz simulado tanto para o cenário de análise do Modelo I, assim como para o Modelo II, apresentaram como resultados uma taxa de confiabilidade acima do valor recomendado.

7.4.2 Análise Comparativa dos Resultados do *Link* (UT_SA) em relação a outros *Softwares*

Neste tópico foram realizadas comparações relativas a atenuação líquida no *link* e da potência recebida, para as frequências de 8,5 GHz e 5 GHz. Logo, as FIGURAS 43 e 44 mostram os resultados da atenuação líquida do *link* obtidas pelas ferramentas de predição SINMCEL, *Radio Mobile* e *LinkCalc*.

FIGURA 43 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O *LINK* (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz.

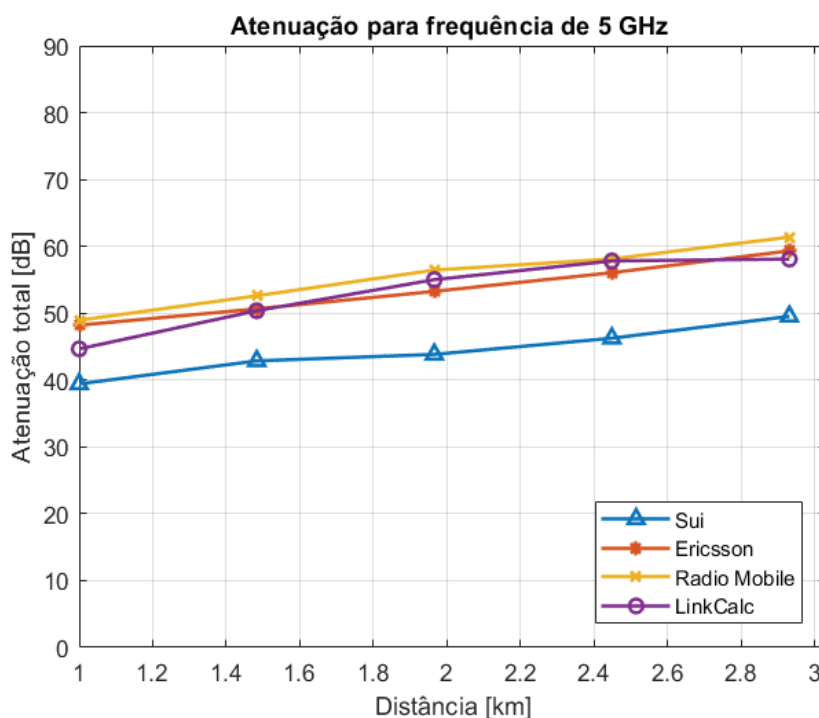


FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

A FIGURA 43, mostrou que o resultado referente a atenuação líquida do *link* para o cenário de análise do Modelo *Sui* foi de 49,53 dB (representado no gráfico pela linha azul), enquanto que para o cenário do Modelo *Ericsson*, este valor ficou em torno de 59 dB (representado no gráfico pela linha laranja). Sendo assim, o resultado da simulação pelo *software Radio Mobile*, obteve uma atenuação líquida no valor em torno de 71 dB (representado no gráfico pela linha amarela) e para a ferramenta *LinkCalc* este valor foi de 65,20 dB (representado no gráfico pela linha roxa).

Portanto, diante desses resultados percebeu-se que existe uma diferença pequena entre os valores obtidos pelos *softwares Radio Mobile*, *LinkCalc* e pela ferramenta SINMCEL para o caso do cenário de análise do Modelo *Ericsson*, ou seja, isso significa dizer, que o valor que apresentou a maior discrepância entre os resultados, foi justamente a resposta mais otimista obtida pelo *software SINMCEL* no cenário de análise do Modelo *Sui*.

FIGURA 44 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O *LINK* (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.

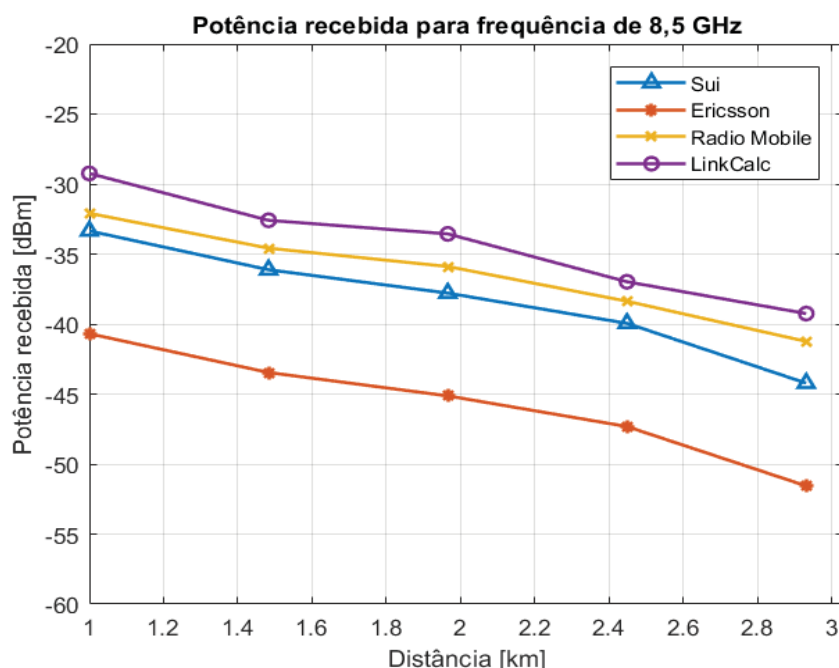


FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

A FIGURA 44 mostrou que o pior resultado obtido para a atenuação líquida foi apresentado pelo *software Radio Mobile* no valor de 61,39 dB (representado no gráfico pela linha amarela), enquanto o melhor resultado foi apresentado pelo SINMCEL para o caso novamente do cenário de análise do Modelo *Sui*, onde o valor encontrado foi de 49,53 dB (representado no gráfico pela linha azul). Já com relação aos resultados decorrentes da simulação do *LinkCalc* e da ferramenta SINMCEL para o caso do cenário do Modelo *Ericsson*, notou-se uma similaridade entre valores encontrados que ficaram em torno de 60 dB (representado no gráfico pela linha roxa) e de 59 dB (representado no gráfico pela linha laranja), respectivamente.

Do exposto, a FIGURA 45 mostra os resultados referentes a potência recebida considerando a frequência de 8,5 GHz.

FIGURA 45 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O *LINK* (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 8,5 GHz



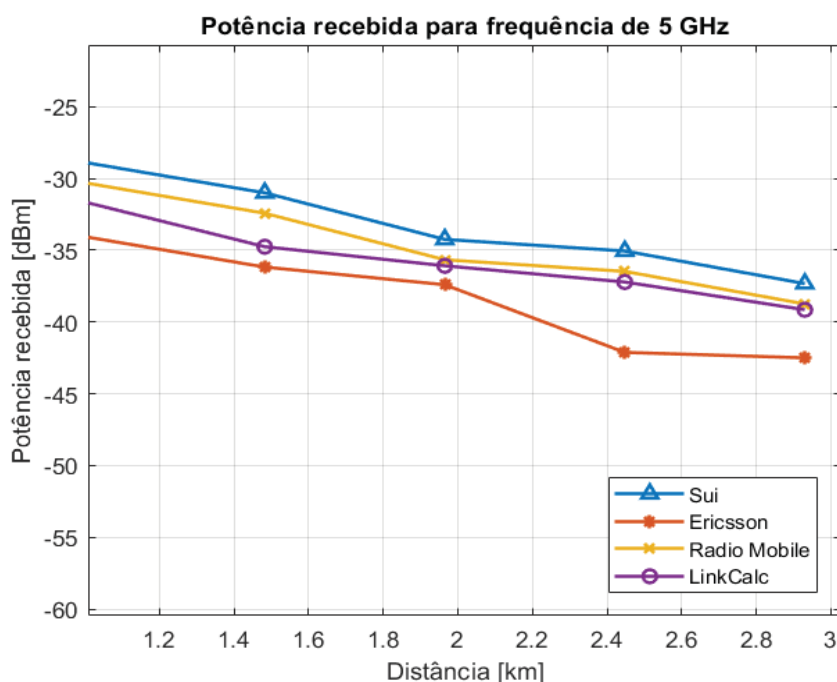
FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

A FIGURA 45, mostrou o resultado referente a potência recebida considerando a simulação realizada pelo SINMCEL, para o cenário de análise do Modelo *Sui*, no valor de $-44,22$ dBm (representado no gráfico pela linha azul), e para o cenário que considerou o Modelo Ericsson, o resultado obtido foi de $-51,56$ dBm (representado no gráfico pela linha laranja). Enquanto, para os *softwares* de predição *Radio Mobile* e *LinkCalc*, os valores obtidos da potência recebida foram de $-41,24$ dBm (representado no gráfico pela linha amarela) e de $-39,25$ dBm (representado no gráfico pela linha roxa) respectivamente. Vale lembrar, que esses resultados foram gerados a partir de uma potência transmitida de 27 dBm para uma sensibilidade limiar de -90 dBm.

Sendo assim, conclui-se que resultado menos favorável da potência recebida foi dado pelo *software* SINMCEL para o caso da simulação que considerou o cenário do Modelo II, enquanto que os demais resultados comportaram-se relativamente de forma similar.

Logo, a FIGURA 46 apresenta os resultados da potência recebida considerando a frequência de operação de 5 GHz.

FIGURA 46 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O *LINK* (UT_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.



FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

A FIGURA 46 mostra que o resultado menos otimista da potência recebida foi gerado no cenário de análise do Modelo *Ericsson*, no valor de $-42,56$ dBm (representado no gráfico pela linha laranja); enquanto o resultado mais favorável foi o fornecido pelo cenário do Modelo Sui, no valor de $-37,33$ dBm (representado no gráfico pela linha azul). No entanto, os resultados obtidos pelo *Radio Mobile* e *LinkCalc* apresentaram respostas muito similares ao resultado gerado pelo cenário do Modelo Sui. Sendo assim, a potência recebida, simulada pelo *Radio Mobile*, assumiu o valor de $-38,75$ dBm (representado no gráfico pela linha amarela) e, para a ferramenta *LinkCalc*, este valor foi de $-39,15$ dBm (representado no gráfico pela linha roxa).

7.5 RESULTADOS E ANÁLISES PARA O *LINK* (UT_P)

Por motivo de organização do documento, e tendo explicado de maneira detalhada e mostrado de forma análoga todo o processo de análise dos resultados, que foram apresentados pelo Diagrama de Nivelamento Dinâmico, Estático e pelos gráficos comparativos, em dois *links* distintos, operando em diferentes frequências, percebeu-se não haver mais a necessidade de se alongar mais sobre o assunto, que

foi pauta de análises exaustiva ao longo desse capítulo. Logo por este motivo, será apresentado apenas uma síntese dos principais resultados que foram obtidos para todos os demais *links* do estudo. A TABELA 21 mostra os resultados do enlace (UT_P):

TABELA 21– COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NO *LINK (UT_P)*

LINK 3 (UT_P) NA FREQUÊNCIA DE 18 GHz – RESULTADO DO DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO		
	Modelo I – <i>Espaço Livre</i>	Modelo II - <i>Ericsson</i>
Atenuação devido ao modelamento do canal	AT_EL = 136.44 dB	AT_ERI = 145.72 dB
Atenuação total líquida	ATOTAL_EL = 81.69 dB	ATOTAL_ERI = 90.96 dB
Potência recebida	PR_EL = -56.69 dBm	PR_ERI = -63.96 dBm
Margem de Desvanecimento	MD_EL = 39.30 dB	MD_ERI = 33.03 dB
Ruído total para 100% do tempo	RT100%_EL = 111 dB	RT100%_ERI = 111.3 dB
Relação sinal/ruído	RSR100%_EL = 37.35 dB	RSR100%_ERI = 28.37 dB
Confiabilidade	CONF_EL = 99.997062 %	CONF_ERI = 98.975151%
LINK 3 (UT_P) NA FREQUÊNCIA DE 5.8 GHz – RESULTADO DO DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO		
	Modelo I – <i>Espaço Livre</i>	Modelo II - <i>Ericsson</i>
Atenuação devido ao modelamento do canal	AT_EL = 126.76 dB	AT_ERI = 126.02 dB
Atenuação total líquida	ATOTAL_EL = 81.93 dB	ATOTAL_ERI = 81.21 dB
Potência recebida	PR_EL = -51.93 dBm	PR_ERI = -51.21 dBm
Margem de Desvanecimento	MD_EL = 35.56 dB	MD_ERI = 36.17 dB
Ruído total para 100% do tempo	RT100%_EL = 103.3 dB	RT100%_ERI = 103.3 dB
Relação sinal/ruído	RSR100%_EL = 38.51 dB	RSR100%_ERI = 39.11 dB
Confiabilidade	CONF_EL = 98.936129 %	CONF_ERI = 99.287937%

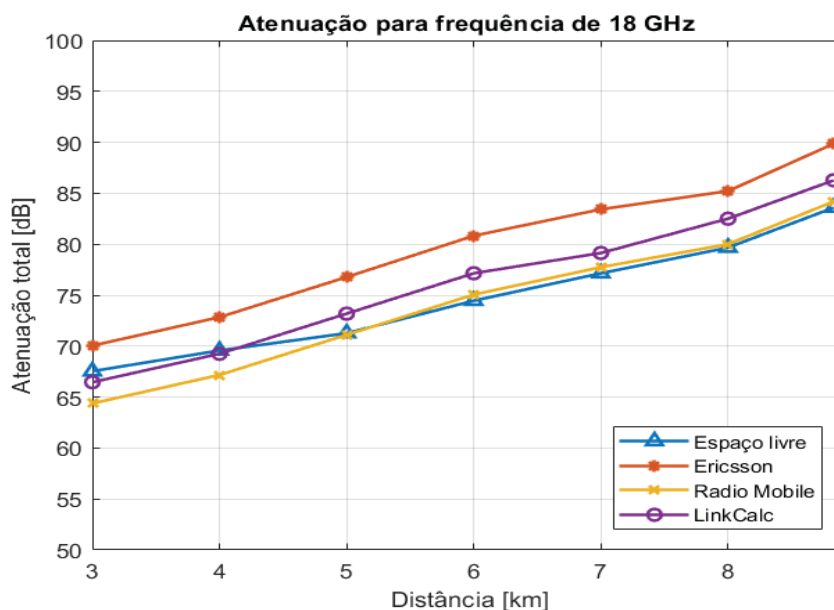
FONTE: A autora (2020).

Os pontos mais importantes, que foram destacados na TABELA 21, mostram que os valores obtidos no enlace (UT_P), na frequência de 18 GHz, alcançaram os resultados mais satisfatórios pelo cenário de análise do Modelo I; enquanto, para a frequência 5,8 GHz, os resultados obtidos tanto para o cenário de análise do Modelo I, bem como para o Modelo II, apresentaram valores relativamente muito próximos entre eles, ou seja, não houve uma diferença significativa entre os cenários simulados.

7.5.1 Análise Comparativa dos Resultados do *Link* (UT_P) em relação a outros Softwares

As FIGURAS 47 e 48 mostram os resultados da atenuação líquida obtidos para o *link* pelas ferramentas de predição SINMCEL, *Radio Mobile* e *LinkCalc*.

FIGURA 47 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O *LINK* (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 18 GHz.

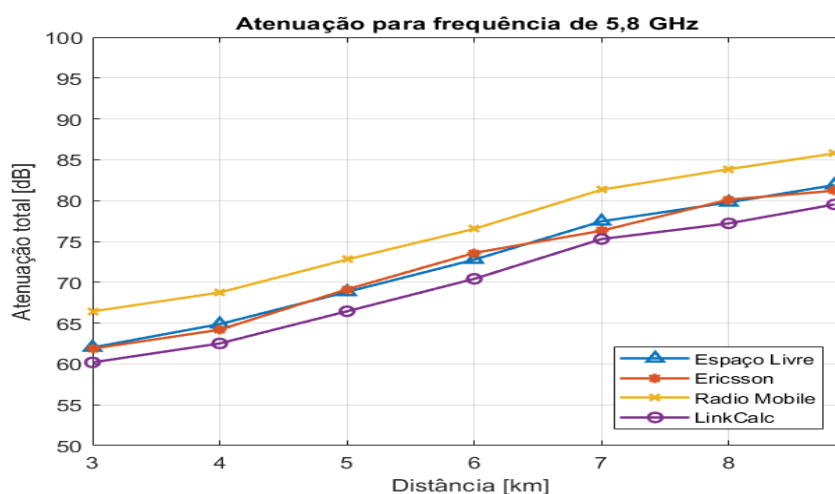


FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

Conforme mostrado na FIGURA 47, os resultados das simulações gerados pelo SINMCEL, no cenário de análise do modelo do Espaço Livre, assim como pelo *software* do *Radio Mobile*, apresentaram uma diferença relativamente pequena entre os seus resultados, onde os valores alcançados foram de 81,69 dB pela ferramenta SINMCEL e de 83,19 dB pelo *Radio Mobile*. Quanto aos resultados decorrentes da simulação do *software LinkCalc* e da ferramenta SINMCEL, para o caso do cenário do Modelo *Ericsson*, resultaram nos respectivos valores de 86,27 dB e de 90,96 dB, ou seja, o pior resultado obtido foi gerado pelo o cenário de análise do Modelo II.

Logo, a FIGURA 48 apresenta o resultado da atenuação total considerando a frequência de 5,8 GHz.

FIGURA 48 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O *LINK* (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz.

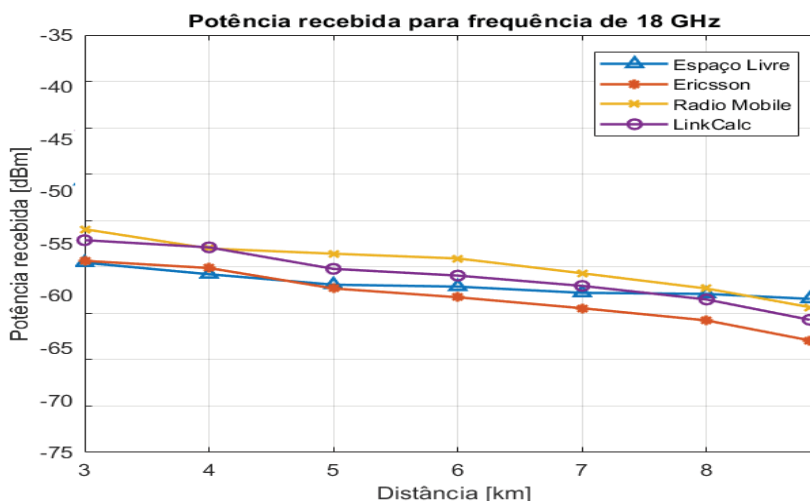


FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

Diferente do resultado anterior, a FIGURA 48 mostrou que o pior resultado da atenuação líquida foi gerado pelo *Radio Mobile* no valor de 85,77 dB, enquanto para as simulações realizadas pelo SINMCEL e *LinkCalc*, os valores obtidos foram de 81,9 dB, relativo ao cenário de análise do modelo do Espaço Livre, de 81,21 dB, referente ao cenário que considerou o modelo Ericsson, e de 79,53 dB, decorrente da ferramenta *LinkCalc*. Logo, percebeu-se que os valores obtidos para atenuação líquida, nesta frequência, apresentaram resultados relativamente próximos entre si, com a exceção apenas para o caso do *Radio Mobile*.

Do exposto, as FIGURAS 49 e 50 mostram os resultados da potência recebida considerando a frequência de 18 GHz e 5,8 GHz.

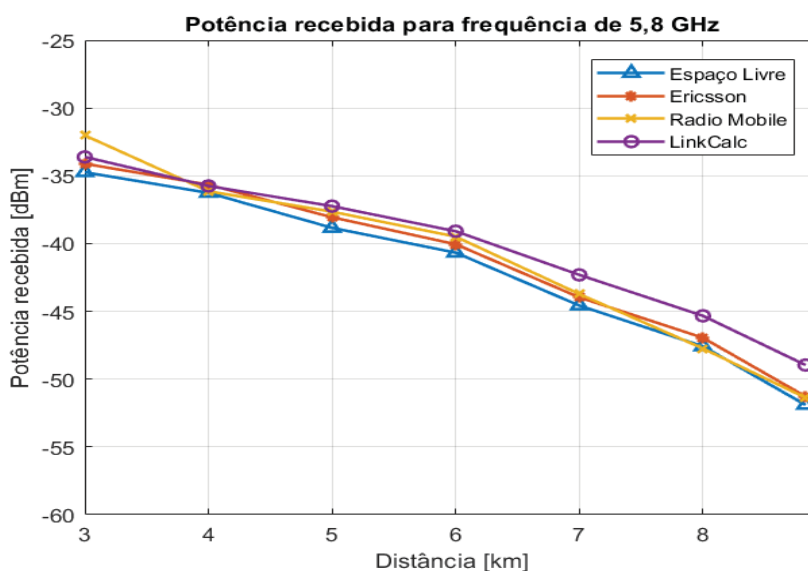
FIGURA 49 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O *LINK* (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 18 GHz.



FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

Com relação a FIGURA 49, percebeu-se que o valor da potência recebida, considerando a simulação realizada pelo SINMCEL, representou o melhor resultado obtido em comparação as demais simulações para o cenário de análise do Modelo do Espaço Livre, no valor de $-56,69$ dBm. Quanto a simulação realizada pelo *Radio Mobile*, foi encontrada uma potência recebida de $-58,68$ dBm, enquanto para a ferramenta *LinkCalc*, o valor obtido foi de $-61,42$ dBm. Portanto, consequentemente, o resultado menos otimista foi obtido pelo cenário de análise que considerou o Modelo Ericsson (*software* SINMCEL), no valor de $-63,96$ dBm.

FIGURA 50 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O LINK (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz.



FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

De acordo com a FIGURA 50, notou-se que os valores obtidos nas simulações seguiram um comportamento gráfico muito similar, onde o resultado menos otimista (diferença mínima em relação as outras simulações) apresentou uma potência recebida de $-51,93$ dBm, decorrente do cenário de análise do Modelo do Espaço livre gerado pela ferramenta SINMCEL. Sendo assim, para as demais simulações, encontrou-se uma potência recebida no valor de $-51,37$ dBm pela ferramenta do *Radio Mobile*, enquanto que para o *software* *LinkCalc* e pelo *software* SINMCEL no cenário do Modelo *Ericsson*, os valores obtidos foram de $-48,96$ dBm e de $-51,28$ dBm respectivamente.

7.6 RESULTADOS E ANÁLISES PARA O LINK (CP_SA)

Neste tópico apresenta-se os resultados obtidos para o *link* (CP_SA), como mostra a TABELA 22:

TABELA 22– COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NO LINK (CP_SA)

LINK 4 (CP_SA) NA FREQUÊNCIA DE 23 GHz – RESULTADO DO DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO		
	Modelo I – Espaço Livre	Modelo II – Longley Rice
Atenuação devido ao modelamento do canal	AT_EL = 132.42 dB	AT_RC = 136.02 dB
Atenuação total líquida	ATOTAL_EL = 86.46 dB	ATOTAL_RC = 90.07 dB
Potência recebida	PR_EL = -66,46 dBm	PR_RC = -70.07 dBm
Margem de Desvanecimento	MD_EL = 31.53 dB	MD_RC = 27.92 dB
Ruído total para 100% do tempo	RT100%_EL = 137.9 dB	RT100%_RC = 138 dB
Relação sinal/ruído	RSR100%_EL = 28.51 dB	RSR100%_RC = 25.95 dB
Confiabilidade	CONF_EL = 98.964912 %	CONF_RC = 97.919461%
LINK 4 (CP_SA) NA FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz – RESULTADO DO DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO		
	Modelo I – Espaço Livre	Modelo II - Longley Rice
Atenuação devido ao modelamento do canal	AT_EL =116.06 dB	AT_RC = 119.67 dB
Atenuação total líquida	ATOTAL_EL = 72.24 dB	ATOTAL_RC = 75.85 dB
Potência recebida	PR_EL = -42.24 dBm	PR_RC = -45.85 dBm
Margem de Desvanecimento	MD_EL = 46.75 dB	MD_RC = 43.14 dB
Ruído total para 100% do tempo	RT100%_EL = 108.9 dB	RT100%_RC = 109.1 dB
Relação sinal/ruído	RSR100%_EL = 40.35 dB	RSR100%_RC = 37.91 dB
Confiabilidade	CONF_EL = 98.998943 %	CONF_RC = 97.997576%

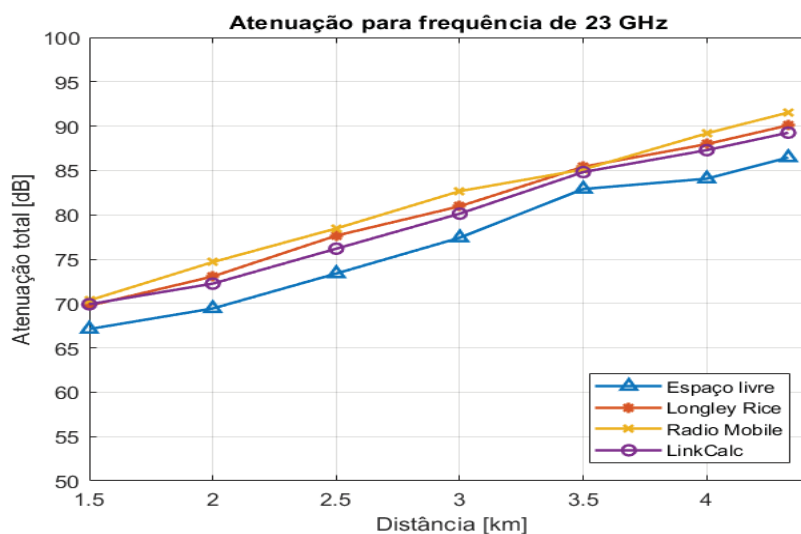
FONTE: A autora (2020).

De acordo com a TABELA 22, os valores obtidos para o enlace (CP_SA), tanto para a frequência de 23 GHz quanto para 3,5 GHz, apresentaram resultados menos satisfatórios pela simulação que considerou o cenário de análise do Modelo II.

7.6.1 Análise Comparativa dos Resultados do *Link* (CP_SA) em relação a outros Softwares

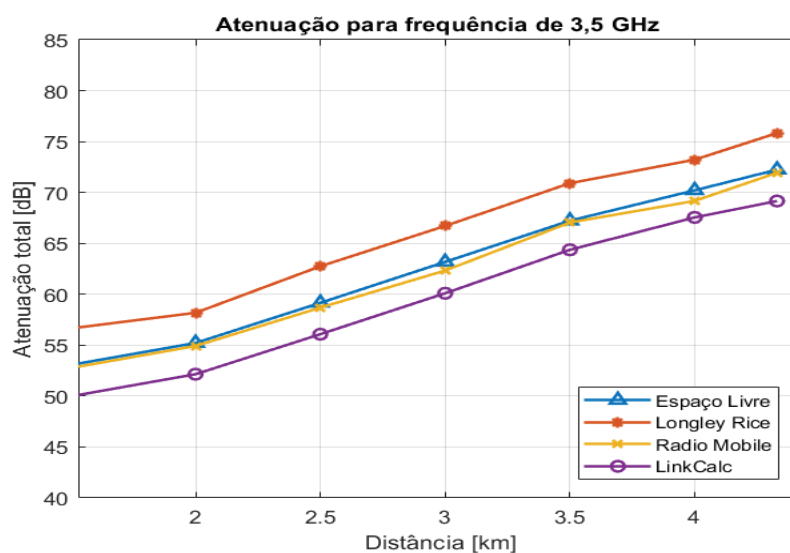
As FIGURAS 51 e 52 mostram os resultados da atenuação líquida nas frequências de operação de 23 GHz e 3,5 GHz.

FIGURA 51 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O *LINK* (CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 23 GHz.



FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

FIGURA 52 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA PARA O *LINK* (CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.



FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

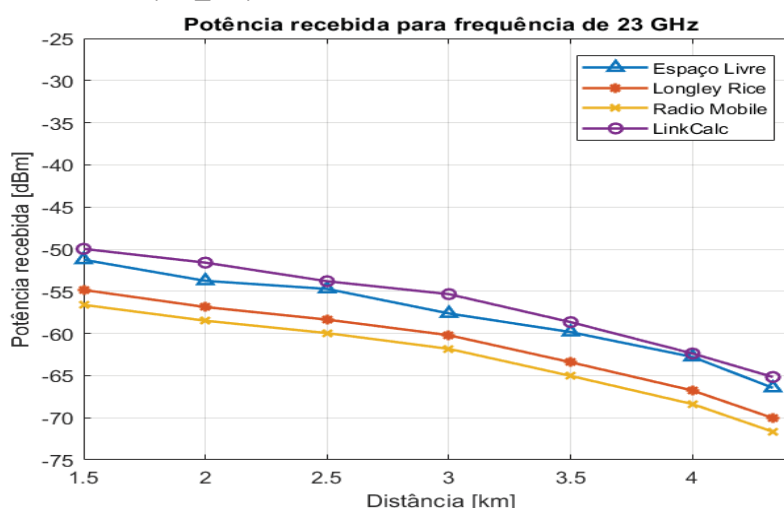
De acordo com a FIGURA 51, a simulação proveniente pelo *software Radio Mobile* apresentou o pior resultado referente a atenuação líquida para frequência de

23 GHz, onde o valor obtido ficou em torno de 92 dB e para a simulação no *LinkCalc* este valor foi de 89,26 dB. Já com relação as simulações geradas pelo SINMCEL, notou-se que o cenário de análise que considerou o Modelo do Espaço Livre mostrou uma atenuação de 86,46 dB; enquanto para o cenário do Modelo do *Longley Rice*, este valor foi de 90,07 dB, ou seja, consequentemente o cenário de análise do Espaço Livre, representou o melhor resultado encontrado para o *link* em comparação as demais respostas apresentadas.

A FIGURA 52 mostrou que o melhor resultado da atenuação líquida foi obtido pela ferramenta *LinkCalc*, no valor em torno de 69 dB; enquanto o resultado menos otimista foi gerado pela ferramenta SINMCEL no cenário de análise que considerou o Modelo *Longley Rice*, no valor de 75,83 dB. Quanto aos resultados relativos a simulação do *Radio Mobile* e da ferramenta SINMCEL para o caso do cenário do Modelo Espaço livre, resultaram nos valores de 71,94 dB e 72,24 dB respectivamente. Esta similaridade entre os resultados obtidos nas duas ferramentas, pode ser observado através do comportamento gráfico mostrado na FIGURA 52.

Do exposto, a FIGURA 53 mostra os resultados da potência recebida considerando a frequência de 23 GHz.

FIGURA 53 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O *LINK* (CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 23 GHz.



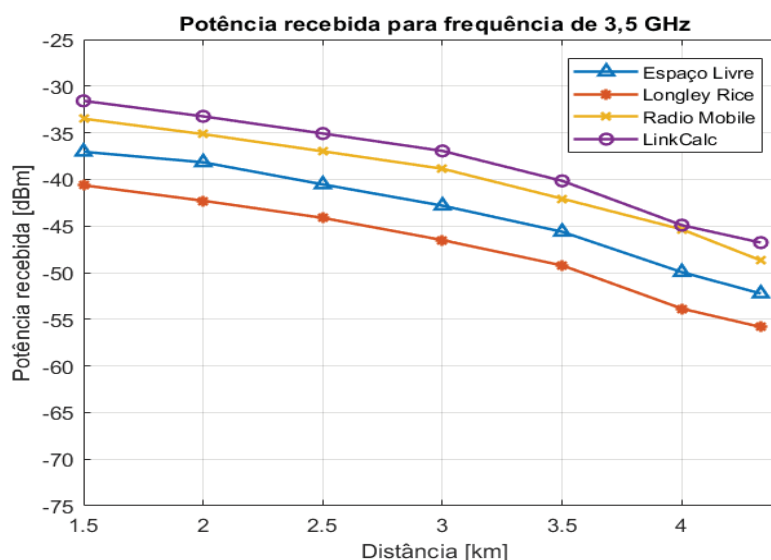
FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

Com relação a FIGURA 53, pode-se dizer que o valor da potência recebida, considerando a simulação realizada pelo *LinkCalc*, foi de -65,17 dBm, que representou o melhor resultado obtido entre as simulações, enquanto para a

ferramenta SINMCEL no cenário de análise do Modelo do Espaço Livre, este valor foi de $-66,46$ dBm e para o cenário do Modelo *Longley Rice* de $-70,04$ dBm. Portanto, consequentemente, o pior resultado foi obtido pelo *software Radio Mobile* no valor de $-71,66$ dBm.

Logo, a FIGURA 54 apresenta os resultados da potência recebida considerando a frequência de 3,5 GHz.

FIGURA 54 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DA POTÊNCIA RECEBIDA PARA O *LINK* (CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz



FONTE: Simulação no *MatLab* (2020).

Segundo os resultados apresentado na FIGURA 54, os valores obtidos nas simulações seguiram parcialmente a mesma linha de ocorrências da figura precedente. Ou seja, pelo *LinkCalc* foi obtido o valor de $-46,78$ dBm, que correspondeu ao resultado mais favorável encontrado entre as simulações. No entanto, para a ferramenta SINMCEL os valores encontrados foram de $-52,24$ dBm, relativo ao cenário de análise do Modelo do Espaço Livre e de $-55,83$ dBm referente ao cenário do Modelo *Longley Rice*; enquanto, para o *software LinkCalc*, este valor foi de $-46,78$ dBm. Portanto, nesse caso, o resultado menos otimista foi gerado pelo cenário do Modelo do *Longley Rice* gerado pela ferramenta SINMCEL.

7.7 RESULTADOS E ANÁLISES PARA O *LINK* (CP_C)

Neste item apresenta-se os resultados que foram encontrados para o último *link* desse estudo conforme mostra a TABELA 23:

TABELA 23 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NO *LINK* (CP_SA)

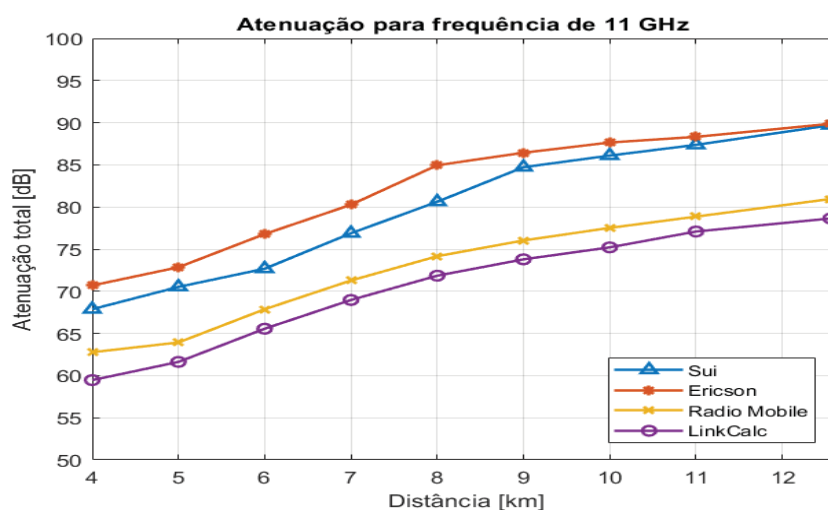
LINK 5 (CP_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 11 GHz – RESULTADO DO DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO		
	<i>Modelo I – Sui</i>	<i>Modelo II – Ericsson</i>
Atenuação devido ao modelamento do canal	AT_SUI = 141.64 dB	AT_ERI = 141.80 dB
Atenuação total líquida	ATOTAL_SUI = 89.70 dB	ATOTAL_ERI = 89.87 dB
Potência recebida	PR_SUI = -59.70 dBm	PR_ERI = -59.87 dBm
Margem de Desvanecimento	MD_SUI = 33.29 dB	MD_ERI = 33.12 dB
Ruído total para 100% do tempo	RT100%_SUI = 135.8 dB	RT100%_ERI = 135.8 dB
Relação sinal/ruído	RSR100%_SUI = 28.37 dB	RSR100%_ERI = 25.08 dB
Confiabilidade	CONF_SUI = 97.876580 %	CONF_ERI = 97.575650 %

FONTE: A autora (2020).

Conforme mostra TABELA 23, os resultados obtidos tanto para o cenário de análise do Modelo I, assim como para o Modelo II, apresentaram valores relativamente muito próximos entre si, ou seja, não houve uma diferença considerável entre seus resultados. Para este enlace, foi realizado uma simulação considerando apenas a frequência de operação de 11 GHz.

7.7.1 Análise Comparativa dos Resultados do *Link* (CP_P) em relação a outros Softwares

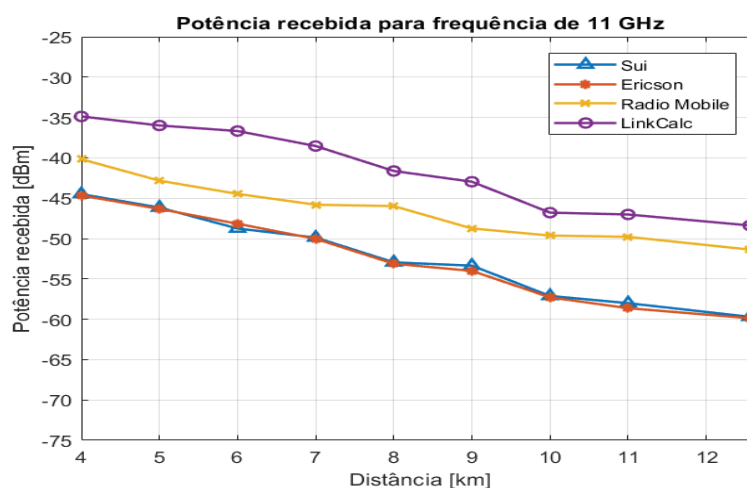
As FIGURAS 55 e 56 mostram os resultados da atenuação líquida e da potência recebida na frequência de operação de 11 GHz.

FIGURA 55 - RESULTADO GRÁFICO COMPARATIVO DO RESULTADOS DA ATENUAÇÃO LÍQUIDA DO *LINK* (CP_P).

FONTE: Software Matlab (2020).

Conforme mostrado na FIGURA 55, os resultados das simulações relativas a atenuação líquida, geradas pelo SINMCEL, apresentaram valores muito similares entre si (representando os maiores valores de atenuação), enquanto a menor atenuação obtida, foi dada pela ferramenta *LinkCalc*, no valor de 77,62 dB. Logo, a FIGURA 56 apresenta os resultados da potência recebida.

FIGURA 56 - GRÁFICO COMPARATIVO DO RESULTADOS DA POTÊNCIA RECEBIDA DO LINK (CP_P).



FONTE: *Software Matlab* (2020).

Já com relação a FIGURA 56, pode-se dizer que se repetiu a mesma tendência de comportamento ocorrida na figura anterior, pois, novamente, os resultados relativos a ferramenta SINMCEL apresentaram uma diferença mínima entre seus valores e também os mais baixos resultados de potência recebida, enquanto que a maior potência recebida foi obtida pelo software *LinkCalc* no valor de -47,82 dBm.

7.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste trabalho, procurou-se, através da técnica do Diagrama de Nivelamento, dar consistência a uma metodologia que associou uma diversidade de parâmetros importantes de concepção, combinado a um conjunto de modelos de propagação, com a finalidade de proporcionar ao conceitor uma forma diferenciada de se abordar ou discutir os resultados obtidos de um Sistema de Transmissão. Portanto, o Diagrama de Nivelamento na sua forma dinâmica ou estática discutido ao longo deste

capítulo, foi uma interface original gráfica, visual, que além de mostrar o *link* de modo fim-a-fim, também realizou simulações simultâneas entre os modelos de propagação.

Para fins de validação, o cenário da aplicação foi criado para a Cidade de Curitiba, onde toda uma análise técnica foi realizada, mantendo como foco os aspectos relacionados aos modelos de propagação e aos seguintes parâmetros: normas e recomendações técnicas, geometria, frequência, perdas, potências, ruído e confiabilidade de cada *link*.

Foi observado na análise dos resultados, a importância do uso das normas ou recomendações, principalmente, na escolha do nível de potência transmitida, nas referências indicativas em relação às margens e ao limite máximo de ruído permitido, dentro de um sistema, que impacta diretamente no desempenho bem como no processo para determinar a confiabilidade do *link*. E, para concluir, pode-se dizer que, por meio deste estudo, foi possível observar que todos os cinco *links* analisados, apresentaram em sua grande parte um bom desempenho, assim como uma confiabilidade acima de 97%.

CAPÍTULO 8 CONCLUSÃO E PROPOSTAS FUTURAS

8.1 CONCLUSÃO

Sistemas de Transmissão atualmente são sub-descritos na literatura especializada. A proposta deste trabalho foi, contrariamente ao que existe na literatura atual, apresentar uma metodologia original, interativa e dinâmica de análise dos resultados obtidos no processo de concepção de um sistema de transmissão multiponto. Para que o sistema real, aqui apresentado, tivesse as vantagens de ser analisado de modo dinâmico, desenvolveu-se uma nova metodologia de análise, aqui chamada de diagrama de nivelamento. Logo, ao longo de todo este estudo, procurou-se evidenciar as vantagens no uso dessa técnica em comparação ao que atualmente existe na literatura especializada.

Vale enfatizar que, este estudo partiu de duas ideias, primeiramente, pela investigação sobre o funcionamento dos *softwares* de predição (quer sejam eles livres ou não) frequentemente utilizados na área. A partir deste entendimento, percebeu-se que a maioria deles apresentam seus resultados de simulações de forma embutida, normalmente por meio de tabelas, planilhas, curvas estatísticas ou comparativas. Sabe-se que, apesar dessas formas de apresentação de resultados obterem êxito e serem usualmente utilizadas em grande parte dos trabalhos de pesquisa da área, notou-se uma carência em relação a uma transparência sobre o detalhamento dos parâmetros não visíveis ao usuário que estruturam essas ferramentas, e que atuam indiretamente sobre os resultados gerados por elas.

Além desse ponto, outra observação importante, que foi notada nessas ferramentas de predição tradicionais, é o fato de cada simulação realizada por elas, considera apenas um modelo de propagação por vez para análise, ou seja, não existe na literatura atual, ferramentas disponíveis para a comunidade que sejam capaz de gerar e comparar de forma simultânea dois ou mais modelos de propagação.

Logo, fica claro que a forte motivação deste estudo foi principalmente provar que, ao final do processo, é possível à obtenção de uma visão global do Sistema, a qual conjugue de forma transparente a combinação de parâmetros relacionados a modelos de propagação, geometria, atenuação, potência, ruído e confiabilidade de forma interligada e dispostos de modo visual.

E, tão pertinente quanto esta conjugação de resultados, são as principais normas técnicas e resoluções vigentes que limitam ou restringem o funcionamento de um Sistema em aspectos tais como: limitações relacionadas à escolha do nível de potência, limitações nas referências indicativas em relação ao máximo ruído tolerado e limitações devido a problemas diversos de probabilidade de inoperância, que também são aspectos bastantes relevantes para análise final de funcionamento de um Sistema de Transmissão.

A partir dessa compreensão da importância de todos os parâmetros que compõem esse sistema, foi desenvolvida a técnica do Diagrama de Nivelamento por meio do *software* de simulação SINMCEL (ferramenta desenvolvida), e nele realizado um estudo de caso, fundamentado em quatro estações na cidade de Curitiba, para análise de cinco *links* nas faixas de frequências licenciadas de 3,5 GHz, atualmente ainda na fase de padronização no Brasil, e também de 5 GHz, 8,5 GHz, 11 GHz, 18 GHz e 23 GHz e nas frequências não licenciadas operando nas faixas de 2,4 GHz e 5,8 GHz.

Finalmente, com a metodologia desenvolvida, testada e validada, percebeu-se que essa ferramenta trouxe algumas vantagens para área, como por exemplo, oferecer ao usuário a possibilidade de realizar análise de um *link* de modo fim a fim, e não mais por partes separadas como usualmente é encontrado nos *softwares* de predição tradicionais, além de proporcionar simulações simultâneas de mais de um modelo de propagação, o que torna o método do Diagrama de Nivelamento uma interessante ferramenta a ser utilizada em processos de concepção, uma vez que, podem ser realizadas alterações pontuais no *link*, e os resultados dessas alterações podem se fazer sentir de modo dinâmico em todo ele, o que torna possível uma rápida tomada de decisão acerca do Sistema em estudo.

8.2 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Neste trabalho de pesquisa, foi proposto desenvolver uma metodologia interativa que fosse capaz de simular simultaneamente modelos de propagação explorando também, os parâmetros pertinentes a um Sistema de Transmissão. Logo, os pontos alcançando que foram discutidos neste trabalho se resume em:

- Síntese da ideia de funcionamento da metodologia através de um fluxograma;

- Implementação em PHP dos modelos de propagação, assim como dos parâmetros relativos ao sistema: recomendações e normas técnicas, geometria, frequências, perdas, potência, ruídos, e confiabilidade;
- Implementação das normas técnicas e legais em PHP – definição de canalização e limites atribuídos as oito frequências de estudo visando oferecer, resultados minimamente confiáveis ;
- Sinalização de avisos de alerta para o usuário sobre possíveis erros de preenchimento ou de informações incompatíveis com os limites do sistema (exemplo: utilizar uma potência acima do limite aceitável para uma determinada frequência, o sistema emite um aviso o alertando da falha e ainda indica a resolução que retrata o assunto)
- Construção do *software* SINMCEL na página WEB – foi desenvolvido com a finalidade de gerar gráficos inteligentes aqui chamado de Diagrama de Nivelamento (método proposto e desenvolvido);
- Desenvolvimento do método titulado de Diagramas de Nivelamento Dinâmico e Estático – com o propósito de oferecer a possibilidade de análise do *link* de modo fim-a-fim, obter simulações simultâneas entre modelos de propagação;
- Criação de relatórios em PDF na forma individual ou coletiva (até 8 *links*) – com o intuito de verificar o desempenho de cada link que estruture o sistema como um todo;
- Análises comparativas entre os resultados – com o objetivo de validar o processo metodológico utilizado, foram realizado comparações entre os resultados gerados pela ferramenta SINMCEL em relação a outras ferramentas de acesso livre. Estas comparações foram feitas com o *software* MATLAB®;

8.3 TRABALHOS FUTUROS

A partir desse trabalho, é possível indicar desdobramentos sobre temas de estudos para futuras pesquisas. Neste sentido, propõem-se as seguintes ideias:

- Implementar no sistema parâmetros relacionados a comunicação no que se refere, a *throughput*, a diferentes tipos de modulação, ruídos interferentes do tipo co-canal e adjacente, ou seja, os principais aspectos que caracterizam a QoS (*Quality of Service*);

- Utilizar da técnica de inteligência artificial para mapear, em tempo real, as características topográficas, bem como os aspectos morfológicos da região em que o enlace está inserido. Para que a partir desses dados, a ferramenta seja capaz de sugerir ao usuário os modelos mais adequados para serem utilizados, considerando as características específicas para aquele *link*.
- Implementação do sistema de comunicação móvel, que irá possibilitar a utilização de diversos modelos de propagação que utilize frequências na faixa de micro-ondas;

8.4 PUBLICAÇÕES

Ao longo do desenvolvimento desta tese, foram realizadas contribuições para o desenvolvimento da comunidade científica sob a forma de publicações por:

Revistas Revisadas por Pares

OTOBO, T. M. S.; TERTULIANO FILHO, H. **An Innovative Graphical Viewer Analysis Applied in a Multipoint Transmission System**, in IEEE Access, vol. 7, pp. 82473-82490, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923371, 2019.

Anais da Conferência

OTOBO, T. M. S. ; TERTULIANO FILHO, H. **Método de Concepção de Sistema de Transmissão Ponto Multiponto com Enfoque na Ocupação Espectral, Potência Recebida e Probabilidade de Outage**, In: XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, SÃO PEDRO, SP. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, pp. 1118-1122, 2017.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Resolução nº 711 de 26 de fevereiro de 2010: Regulamento sobre canalização e condições de uso da faixa de 3,5 GHz.** Acesso 10 de dezembro de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Resolução nº 495 de 10 de agosto de 2008: Regulamento sobre canalização e condições de uso da faixa de 5 GHz.** Acesso 17 de março de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Resolução nº 106 de 26 de fevereiro de 1999: Regulamento sobre canalização e condições de uso da faixa de 8,5 GHz.** Acesso 17 de março de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Portaria nº 605 de 17 de agosto de 1994: Regulamento sobre canalização e condições de uso da faixa de 11 GHz.** Acesso 17 de março de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Portaria nº 1.288 de 21 de outubro de 1996: Regulamento sobre canalização e condições de uso da faixa de 18 GHz.** Acesso 19 de março de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Portaria nº 1.120 de 14 dezembro de 1994: Regulamento sobre canalização e condições de uso da faixa de 23 GHz.** Acesso 20 de março de 2019.

ABDULMALIK, I. S.; ALWARAFY, A.; MACCARTNEY, G. R.; RAPPAPORT, T. S.; ALSANIE, A. **Directional Radio Propagation Path Loss Models for Millimeter-Wave Wireless Networks in the 28-, 60-, and 73-GHz Bands.** In: IEEE Transactions on Wireless Communications. vol. 15. pp. 6939-6947, Oct. 2016.

ABUGHALIA, M. F.; AHSAN, S. M.; SAHA S. **Comparative Study of Microcell's Performance using Different Models in Different Regions.** International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), Dhaka. Bangladesh. pp. 517-521, 2019.

ANUSHA, V. S.; NITHYA, G. K.; RAO, S. N. **A comprehensive survey of electromagnetic propagation models.** International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). Pp. 1457-1462, 2017.

BARCLAY, L. **Propagation of Radiowaves,** 2013.

BLAUNSTEIN, N. **Radio Propagation in Cellular Networks.** Boston, Artech House, 2000.

COLEÇÃO BRASILEIRA DE DIREITO DAS TELECOMUNICAÇÕES Vol. I **“Coletânea de Normas e Julgados de Telecomunicações”**, 2010.

COLDREY, M.; KOORAPATY, H.; BERG, J. E.; GHEBRETENSAÉ, Z.; HANSRYD, J.; DERNERYD, A.; FALAHATI, S. **Small-Cell Wireless Backhauling: A Non-Line-of-Sight Approach for Point-to-Point Microwave Links**. Vehicular Technology Conference (VTC Fall). pp. 3-6. Sept, 2012.

COLLIN, R. E. **Antennas and Radiowave Propagation**. McGraw-Hill International, 1985.

CASTRO, B. S. L.; Gomes, I. R. F.; RIBEIRO, C. J.; CAVALCANTE, G. P. S. **COST231-Hata and SUI Models performance using a LMS tuning algorithm on 5.8GHz in Amazon Region cities**. Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona. pp. 1-3, 2010.

CESAR.K. **Organização do Espectro para Radioenlaces Ponto-a-Ponto**, 2003.

DEMINCO, N.; MCKENNA, P. M. **Evaluaaation and comparative analysys of radiowave propagation and measurements**. Applied Computational Eletromagnetics Society Symposium Digest. Vol. X, Mar 2002.

EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE (ETSI). **Fixed Radio Systems; Multipoint equipment and antennas; Generic harmonized standard for multipoint digital fixed radio systems and antennas covering the essential requirements under article 3.2 of the Directive**. ETSI 301 753. V1.2.1 2003-12.

EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE (ETSI). **Fixed Radio Systems; Point-to-point equipment; Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH); Low and medium capacity and STM-0 digital radio system operating in the frequency bands in the range 3 GHz to 11 GHz**. ETSI EN 301 216. V1.2.1. (2001-03).

EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE (ETSI). **Fixed Radio Systems; Point-to-point equipment; high capacity fixed radio systems carrying SDH signals (2 x STM-1) in frequency bands with 40 MHz channel spacing and using Co-Channel Dual Polarized (CCDP) operation**. ETSI EN 301 461. V1.3.1. (2002-11).

ELNASHAR, A. E.; SAIDNY, M. A.; SHERIF, M. **Desing, deployment and performance of 4G-LTE network: A practical approach**. Jonh Wiley & Sons, 2014.

FRIIS, H. T. **A Note on a Simple Transmission Formula**. Proceedings of the IRE and Waves and Electrons. p. 254–256, 1946.

GIBBINS, C.J. **Radiowave Propagation in the Millimetric Bands**. Rutherford. Appleton Laboratories, presented at the Seminar "Business Opportunities in the Millimetric Wavebands. London, 27 June 1990

GOMES, R.; GERALDO, G. **Sistemas de Radioenlace Digitais Terrestres e por Satélite**. Editora: Èrica. São Paulo, 2013.

HAL, M. P. M. **Propagation of Radiowaves**. IEE, London, 1996.

ITU-R P.341-5. **The concept of transmission loss for radio links**, 2001.

KITAO, K.; IMAI, T.; TRAN, N.; OMAKI, N. **Path loss prediction model for 800 MHz to 37 GHz in NLOS microcell environment**. Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE 26th Annual International Symposium, 2015.

KONSTANTINOU, K.; KANG, S.; BROWN, T.; TZARAS, C. **Measurement and modelling of the propagation channel between low-height terminals. Microwaves**. Antennas & Propagation. IET. 5. 412 – 418, 2011.

KASCHEL, H. S.; COSTOYA, E. **Modeling and Simulation of the ITM Model for Point to Point Prediction on Digital Television Extensible to other Technologies**. IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA). pp. 1-6, 2018.

KOTAMRAJU, S. K.; KORADA, C. S. K. **Precipitation and other propagation impairments effects at microwave and millimeter wave bands: a mini survey**. Atmospheric and Space Sciences. Springer link, 2019.

LYTAEV, M.; VLADYKO, A. **Comparative Analysis of Parabolic Equation Method and Longley-Rice Propagation Model**. International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). pp.1-5, 2019

LONGLEY, A. G.; RICE, P. L. **Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain a computer method**. Report ERL65-ITS67-Washington: NTIA, 1968.

MORENO, L. **Propagation topics in radio link design**. Radio Engineering Services Torino, 2006

MORALES, C. D.; GUEVARA, D.; TRUYOL, M. A. **Using Terrestrial Radio Links to Multilateration Techniques**. IEEE Communications and Computing (COLCOM). Colombian, 2016;

NALINESWARI, D.; RAKESH, N. **Link budget analysis on various terrains using IEEE 802.16 WIMAX standard for 3.5 GHz frequency**. IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). Coimbatore, pp. 1-5, 2015.

ONGARATTO, D. A. S. **Projeto de Sistemas de Comunicação Micro-ondas: Rádio Ponto a Ponto**, 2009.

Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequência no Brasil - ANATEL, 2018.

POPOOLA, S.I.; ATAYERO, A. A.; FARUK, N.; CALAFATE, C. T.; OLAWOYIN, L. A.; MATTHEWS, V. O. **Standard Propagation Model Tuning for Path Loss Predictions**

in Built-Up Environments. Computational Science and Its Applications – ICCSA. Lecture Notes in Computer Science. vol 10409. Springer, 2017.

PARSONS, J. D. **The Mobile Radio Propagation Channel.** Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2000.

PIAU, D. B.; CARRIJO, G. A. **Projeto de Dimensionamento de Enlace de Rádio.** Science & Engineering Journal, 2014.

ROCHE, G. D. LA. **LTE - Advanced and Next Generation Wireless Networks.** 2012.

RECOMMENDATION ITU-R P.676-12. **Attenuation by atmospheric gases and related effects,** 2019.

RECOMMENDATION ITU-R P.838-3. **Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,** 2005.

RECOMMENDATION ITU-R F.1093-2. **Effects of multipath propagation on the design and operation,** 2005.

SIWIAK, K.; BAHREINI, Y. **Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communications.** 3rd ed. Artech House, 2007.

SITAR, **Manual de Projetos Técnicos.** 1º Edição. 2003. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp>>. Acesso 10 de novembro de 2019.

SHAYEA, I.; RAHMAN, T.; BIN A. M.; ISLAM, M. D. **Real Measurement Study for Rain Rate and Rain Attenuation Conducted Over 26 GHz Microwave 5G Link System in Malaysia.** IEEE Access, 2018.

STALKE, R. F. **Estudo da Influência dos Efeitos Atmosféricos na Propagação de Ondas Eletromagnéticas na Faixa SHF: Estudo de caso e aplicação a um enlace operando em 23,6GHz.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná. Curitiba PR, 2006.

SIZUN, H. **Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications,** 2005

SON, H.W.; MYUNG, N. H. **A deterministic ray tube method for microcellular wave propagation prediction model.** IEEE Trans. Antennas Propagat. vol. 47. pp. 1344–1350, 1999.

SHUMATE, R. **Longley-Rice and ITU-P.1546 Combined: A New International Terrain-Specific Propagation Model.** IEEE 72nd Vehicular Technology Conference – Fall. Ottawa. pp. 1-5, 2010.

SALAMANCA, L.; FUENTES, J. J. M.; OLMOS, P. M. **Review of the Radio Mobile Software as a teaching tool for Radio planning.** IEEE Multidisciplinary Engineering Education Magazine. v. 6, June 2011.

SOFTWARE PARA CÁLCULO DE ENLACE DE RÁDIOS DA EMPRESA (LlgoWave PTP) - *LinkCalc*. Disponível em: <<http://www.ligowave.com/linkcalc>> Acesso em: 12 de fevereiro de 2020.

SALLES, A. A. **Estudo de Viabilidade de Rádio Enlace**. Universidade Federal de Porto Alegre, 2010.

THIEL, J. Oh. M. and SARABANDI, K. **Wave-Propagation**. IEEE Antennas and Propagation Magazine. V 56. pp. 76–88, 2014.

ULABY, F. T.; RAVAIOLI, U. **Fundamentals of Applied Electromagnetics**. 7th ed. Pearson, 2015.

UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES – ITU. **La Unión Internacional de Telecomunicaciones - Visión General**, Genebra, 48p, 2000.

YACOUB, M. D. **General Fading Distributions**. Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações. Vol 17. pag 1-13, junho 2002.

WASHINGTON D, R. **Método de Dimensionamento de Internet via Rádio** SBrT-Sociedade Brasileira de Telecomunicações. Volume I. São Paulo, 2010.

WAICZYK, C.; ENSSLIN, E. R. **Avaliação de produção científica de pesquisadores: mapeamento das publicações científicas**. Revista Contemporânea de Contabilidade. Florianópolis. v. 10. p. 97-112, 2013.

APÊNDICE 1- PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS REFERENTES A SIMULAÇÃO DO LINK (UT_P)

A simulação do *link* (UT_P), na frequência de 18 GHz, utilizando os modelos de propagação do Espaço livre e *Ericsson*.

PARAMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DO *LINK* (UT_P)

<p>PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA</p> <p>FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO (GHz)</p> <p>18</p> <p>FAIXA DE FREQUÊNCIA (MHz)</p> <p>17713.75 à 17727.5</p> <p>MODELO DE PROPAGAÇÃO ESCOLHIDO</p> <p>MODELO I</p> <p>Espaço Livre</p> <p>MODELO II</p> <p>Ericson</p>	<p>POTÊNCIA TRANSMITIDA (dBm)</p> <p>30</p> <p>E.I.R.P (dBm)</p> <p>52.4</p> <p>GANHO DA ANTENA (dBi)</p> <p>41.4</p> <p>TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi)</p> <p>vertical e horizontal</p> <p>ALTURA DA ANTENA (m)</p> <p>35</p> <p>PERDA DEVIDO AO CABO (dB)</p> <p>5</p> <p>PERDA DEVIDO O CONECTOR (dB)</p> <p>1.5</p>	<p>POTÊNCIA LIMIAR (dBm)</p> <p>-97</p> <p>GANHO DA ANTENA (dBi)</p> <p>41.9</p> <p>TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi)</p> <p>vertical e horizontal</p> <p>ALTURA DA ANTENA (m)</p> <p>58</p> <p>BER</p> <p>10^{-9}</p> <p>PERDA DEVIDO AO CABO (dB)</p> <p>1</p> <p>PERDA NO CONECTOR (dB)</p> <p>0.2</p>
--	--	--

FONTE: Software SINMCEL (2020).

Sabe-se que a altura da antena da estação UT continua sendo de 35 metros enquanto que na estação P, o valor assumido foi de 58 metros.

Com relação a frequência de 18 GHz, foi utilizado a faixa de operação de 17713.75 MHz a 17727.5 MHz com uma largura de banda de 13,5 MHz. Vale ressaltar, que os demais parâmetros de entrada seguiram os valores sugeridos pela ferramenta.

A potência transmitida para a frequência de 18 GHz é de 30 dBm em seu valor máximo, considerando um E.I.R.P de 58 dBm. Neste caso, por se tratar de um *link* de distância mediana e que abrange a região urbana de Curitiba, foi utilizado a potência 30 dBm.

Quanto aos modelos de propagação, foram selecionados o do Espaço Livre - escolhido como I opção e *Ericsson* – escolhido como opção II para análise. Os resultados do Diagrama de Nivelamento Dinâmico será apresentado em três partes que correspondem a todos os resultados obtidos da simulação.

DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE PERDAS E DE POTÊNCIA DO *LINK* (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 18 GHz



FONTE: Software SINMCEL (2020).

**DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AO PARÂMETRO DE RUÍDO DO
LINK (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 18 GHz.**



FONTE: Software SINMCEL (2020).

DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE DO *LINK* (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 18 GHz



FONTE: Software SINMCEL (2020).

Análise através do Diagrama de Nivelamento Estático (para o *link* UT_P)

Para este tópico, foram realizadas simulações na frequência de operação 5,8 GHz para o *link* (UT_P), onde os parâmetros de entrada utilizados são mostrados na FIGURA a seguir

PARAMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DO *LINK* (UT_P) CONSIDERANDO O DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO.

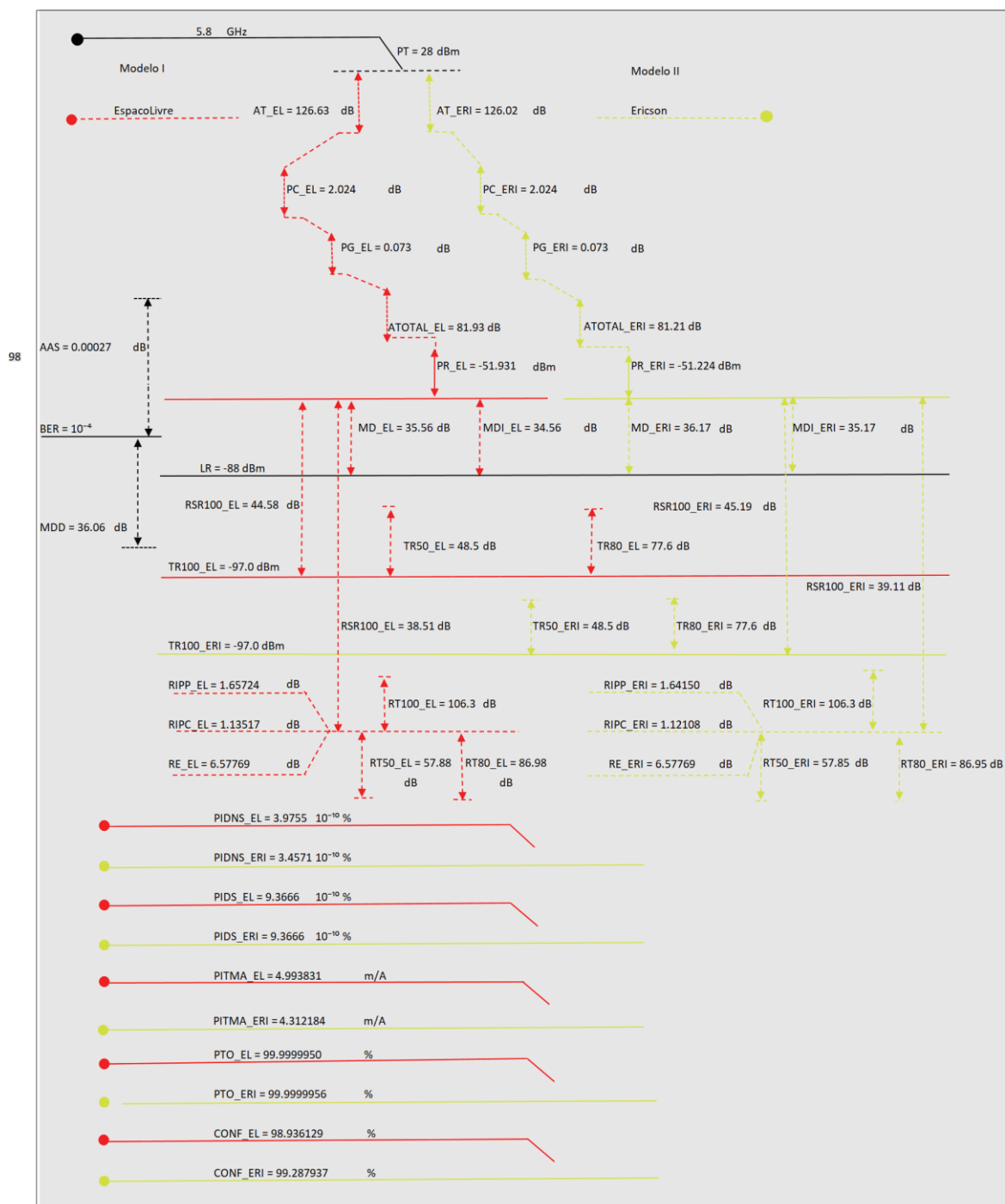
PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA	CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO Tx	CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO Rx
FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO (GHz) 5.8	POTÊNCIA TRANSMITIDA (dBm) 28	POTÊNCIA LIMAR (dBm) -88
FAIXA DE FREQUÊNCIA (MHz) 5750 á 5775	E.I.R.P (dBm) 47.50	GANHO DA ANTENA (dBi) 27.0
MODELO DE PROPAGAÇÃO ESCOLHIDO	GANHO DA ANTENA (dBi) 26.0	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi) horizontal
MODELO I Espaço Livre	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi) horizontal	ALTURA DA ANTENA (m) 58
MODELO II Ericson	ALTURA DA ANTENA (m) 40	BER 10 ⁻⁴
	PERDA DEVIDO AO CABO (dB) 4	PERDA DEVIDO AO CABO (dB) 1
	PERDA DEVIDO O CONECTOR (dB) 0.7	PERDA NO CONECTOR (dB) 0.2

FONTE: Software SINMCEL (2020).

De acordo com a FIGURA anterior dos parâmetros de entrada do *software*, utilizou-se a faixa de frequência de 5750 MHz a 5775 MHz com uma largura de banda de 25 MHz. Por se tratar do mesmo *link* analisado no Diagrama Dinâmico precedente, no que se refere a localização geográfica das estações, foram assumidas as mesmas alturas das antenas cujo os ganhos adotados foram de 26 dBi para a estação UT e de 27 dBi para a estação P.

A potência transmitida foi definida no valor de 28 dBm para um de E.I.R.P de 47.6 dBm. Com relação as perdas devido ao cabo e ao conector bem como a potência limiar, seguiram as sugestões dadas pela ferramenta. E assim como no diagrama anterior, os modelos de propagação selecionados para a simulação foram o do Espaço Livre e do *Ericsson* escolhidos como 1^a e opção 2^a para análise respectivamente. Logo, a FIGURA abaixo apresenta os resultados gerados para estes cenários de simulação.

DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO PARA O LINK (UT_P) PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8GHz.



FONTE: Software SINMCEL (2020).

APÊNDICE 2 - PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS REFERENTES A SIMULAÇÃO DO LINK (CP_SA)

Por se tratar de estações já analisadas, as alturas das antenas CP e SA continuam sendo de 35 metros e de 44 metros respectivamente. Os ganhos sugeridos pela ferramenta foram de 38 dBi para a estação CP e de 39 dBi para a estação SA, assim como as somas das perdas devido ao cabo e ao conector, no valor de 5,1 dB. A faixa de operação selecionada foi de 21,225 MHz a 21,275 MHz com uma largura de banda de 50 MHz.

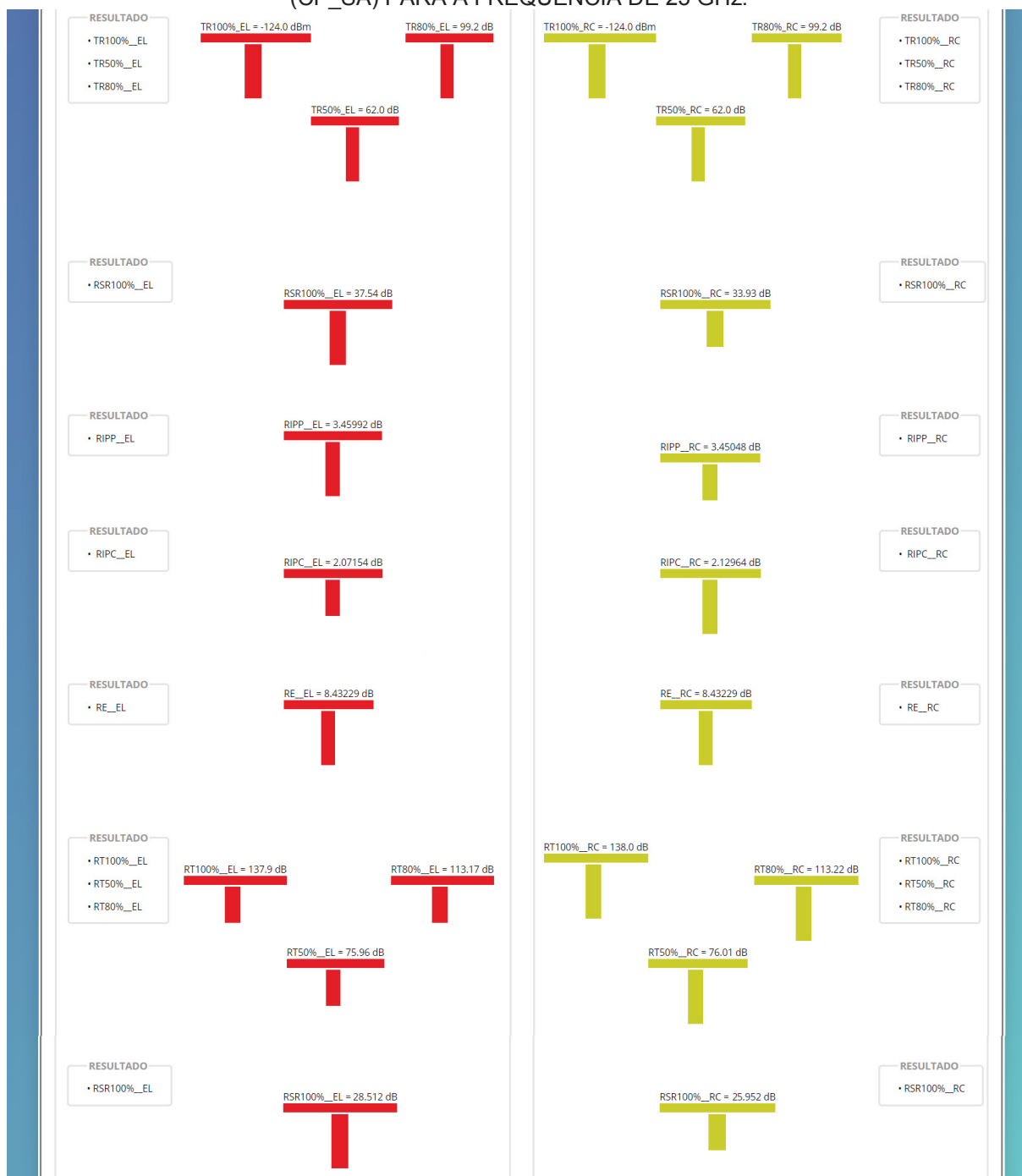
A potência transmitida para esta frequência é limitada a 20 dBm, considerando um E.I.R.P de 49 dBm. Nesse caso, pelo fato de se tratar de um *link* com uma distância que abrange a região urbana densa de Curitiba, foi utilizada a potência máxima de 20 dBm. A potência limiar utilizada, foi a sugerida pelo SINMCEL no valor de -98 dBm para um BER de 10^{-9} . Os modelos de propagação selecionados para a simulação foram a do Espaço Livre e do *Longley Rice*. Logo, os resultados obtidos são mostrados a seguir.

DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE PERDAS E DE POTÊNCIA DO LINK (CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 23 GHz.



FONTE: Software SINMCEL (2020).

DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AO PARÂMETRO DE RUÍDO DO LINK
(CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 23 GHz.



FONTE: Software SINMCEL (2020).

DIAGRAMA DE NIVELAMENTO DINÂMICO REFERENTE AOS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE DO *LINK* (CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 23 GHz.



FONTE: Software SINMCEL (2020).

Análise através do Diagrama de Nivelamento Estático (para o *link* CP SA)

Para este tópico, são mostradas as simulações para o *link* (CP_SA), considerando a na frequência de operação 3,5 GHz. A FIGURA seguir mostra os parâmetros de entrada utilizados para estas simulações.

PARAMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DO *LINK* (CP_SA) CONSIDERANDO O DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO.

<p>PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA</p> <p>FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO (GHz)</p> <p>3.5</p> <p>FAIXA DE FREQUÊNCIA (MHz)</p> <p>3500 a 3510</p>	POTÊNCIA TRANSMITIDA (dBm)	30	POTÊNCIA LIMAR (dBm)	-89
	E.I.R.P (dBm)	39.5	GANHO DA ANTENA (dBi)	25.0
<p>MODELO DE PROPAGAÇÃO ESCOLHIDO</p> <p>MODELO I</p> <p>Espaço Livre</p> <p>MODELO II</p> <p>Longley Rice</p>	GANHO DA ANTENA (dBi)	24.0	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi)	vertical e horizontal
	TIPO DE POLARIZAÇÃO (dBi)	vertical e horizontal	ALTURA DA ANTENA (m)	44
	ALTURA DA ANTENA (m)	35	BER	10^{-4}
	PERDA DEVIDO AO CABO (dB)	4.5	PERDA DEVIDO AO CABO (dB)	1
	PERDA DEVIDO O CONECTOR (dB)	0.3	PERDA NO CONECTOR (dB)	0.2

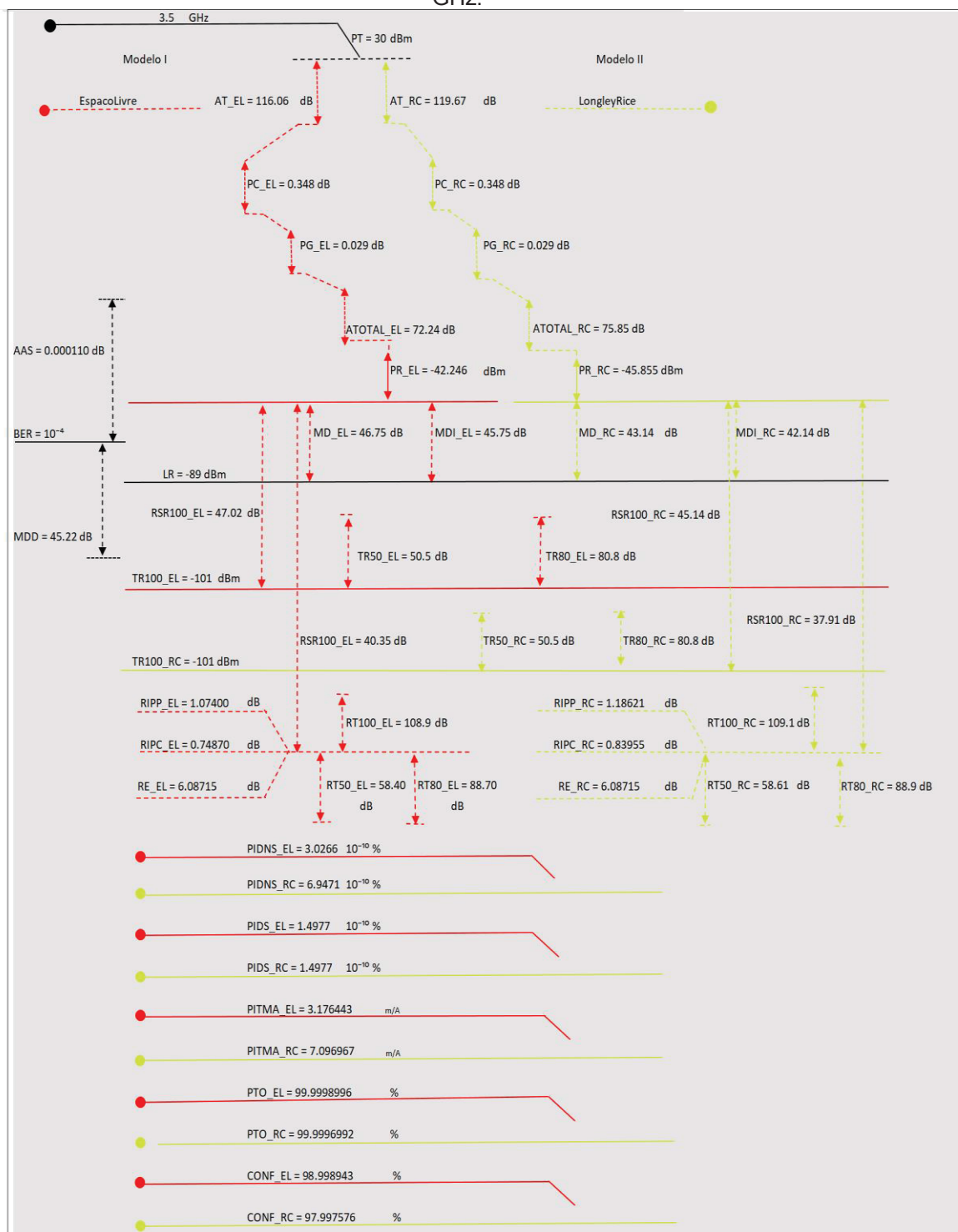
FONTE: Software SINMCEL (2020).

Foram utilizados os ganhos sugeridos pela ferramenta no valor de 24 dBi para a estação CP e de 25 dBi para a estação SA, assim como as perdas devido ao cabo e ao conector nos valores de 4,5 dB e 0,3 dB respectivamente.

Quanto à frequência de 3,5 GHz, foi escolhida a faixa de operação de 3500 MHz a 3510 MHz com uma largura de banda de 10 MHz e uma potência transmitida no valor de 30 dBm considerando um E.I.R.P de 39,5 dBm.

Os modelos de propagação selecionados para esta simulação foram os mesmos da simulação anterior, Espaço Livre e do *Longley Rice*. Logo, a FIGURA a seguir apresenta os resultados da simulação.

DIAGRAMA DE NIVELAMENTO ESTÁTICO PARA O LINK (CP_SA) PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.



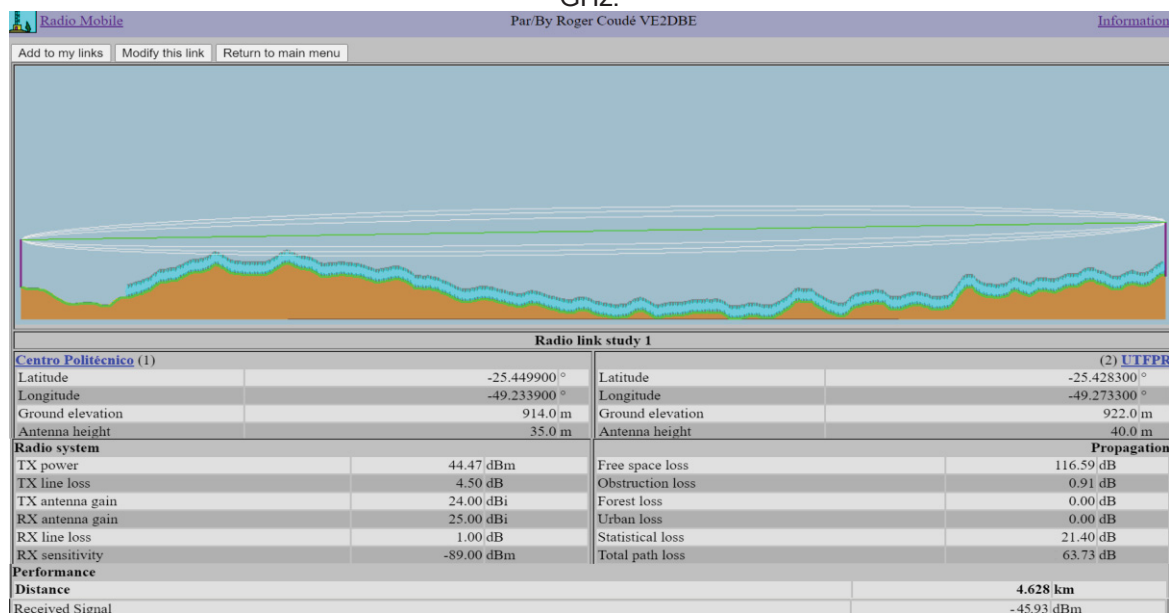
FONTE: Software SINMCEL (2020).

APÊNDICE 3 - PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS REFERENTES A SIMULAÇÃO DO LINK (CP_P)

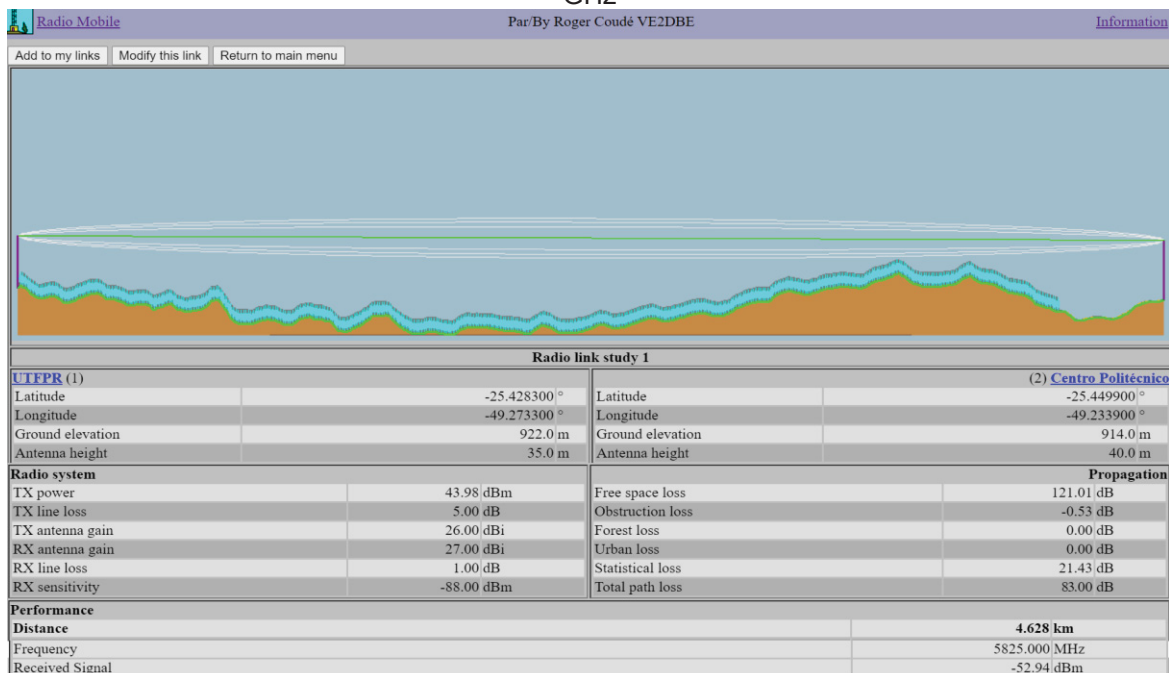
ANEXO 1 - RESULTADOS REFERENTES A SIMULAÇÃO DO LINK (UT_CP) GERADOS PELAS FERRAMENTAS RADIO MOBILE E LINKCALC

Resultados das simulações dos *softwares* Radio Mobile e LinkCalc do enlace (UT_CP) para as frequências de 3,5 GHz e de 5,8 GHz.

SIMULAÇÃO DO LINK (UT_CP) NA FERRAMENTA RADIO MOBILE PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz.



SIMULAÇÃO DO LINK (UT_CP) NA FERRAMENTA RADIO MOBILE PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz



SIMULAÇÃO DO LINK (UT_CP) NA FERRAMENTA LINKCALC PARA A FREQUÊNCIA DE 3,5 GHz

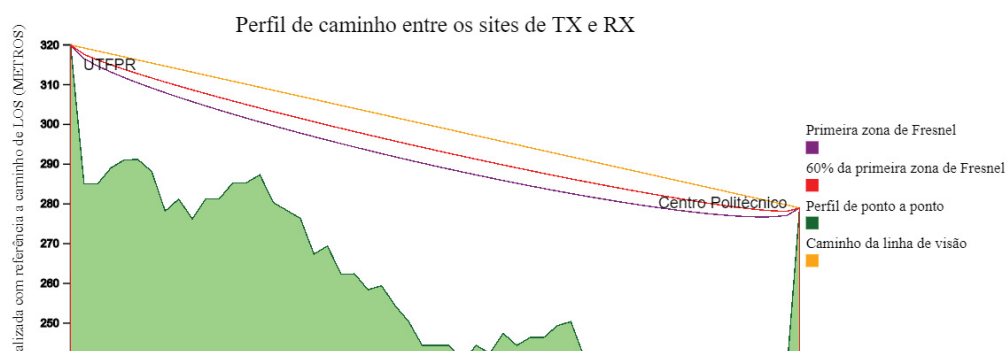
LinkCalc Contato Links rápidos ▾

Mapa Parameters Resultados Links salvos ?

Perda total do caminho	62	dB	Margem de desbotamento...	50	dB
Nível de sinal no local da RX	-39.36	dBm	Distância entre os locais	4.63	km
EIRP	42.00	dBm	Disponibilidade do link dev...	n/a	Q

Compartilhar Link ? Link público 🔗 Link privado 🔒

📄 Criar relatório (PDF) 📁 Salvar Registro



SIMULAÇÃO DO LINK (UT_CP) NA FERRAMENTA LINKCALC PARA A FREQUÊNCIA DE 5,8 GHz

LinkCalc Contato Links rápidos ▾

Mapa Parameters Resultados Links salvos ?

Perda total do caminho	65	dB	Margem de desbotamento...	48	dB
Nível de sinal no local da RX	-38.75	dBm	Distância entre os locais	4.63	km
EIRP	44.00	dBm	Disponibilidade do link dev...	n/a	Q

Compartilhar Link ? Link público 🔗 Link privado 🔒

📄 Criar relatório (PDF) 📁 Salvar Registro

